UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA
ORIENTACIÓN EN ASTROFÍSICA TEÓRICA

Estudio de Teorías de Gravedad Modificada en Binarias Abiertas de Gaia

TESIS DOCTORAL

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN ASTROFÍSICA

PRESENTA:
Ricardo Adán CORTÉS MARTÍN

BAJO LA ASESORÍA DE:
Dr. Xavier HERNÁNDEZ DÖRING
Instituto de Astronomía

COMITÉ TUTOR:
M. en C. Christine Allen Armiño, Instituto de Astronomía
Dr. Sergio Mendoza Ramos, Instituto de Astronomía
Dra. Margarita Rosado Solís, Instituto de Astronomía

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2024

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para obtener más información sobre este documento, por favor visite el sitio
https://github.com/rcortes100/TesisDoctoralRACM

Agradecimientos

La culminación de esta tesis ha sido posible gracias al apoyo y la colaboración de muchas personas y entidades a las que deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor de tesis, el Dr. Xavier Hernández Döring, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Desde que inicié mis estudios de maestría en el Instituto de Astronomía de la UNAM, ha sido un guía en muchos aspectos tanto académicos como de desarrollo personal. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mis profesoras y profesores del Instituto de Astronomía de la UNAM, gracias por haberme proporcionado las herramientas y el conocimiento necesario para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica ha sido una fuente constante de inspiración. En especial quiero agradecer a los miembros de mi comité tutor, Christine Allen, Sergio Mendoza y Margarita Rosado, que siempre han mostrado apoyo e interés por este proyecto, inclusive en medio de las complicaciones que representó la Pandemia de COVID-19 durante mis estudios de doctorado.

Deseo también expresar mi gratitud a mis compañeros y compañeras de estudio, en especial a mis compañeros de cubículo, Jackie García y Gibrán Morales por su apoyo incondicional, sus valiosos comentarios y por compartir este viaje académico conmigo. También a todos los chicos que transitamos por el Cubículo 247 (Mike, Oriana, Gaby, Carlos y Aguayo), a Gerardo Martínez y sus estimulantes pláticas de café, a Norberto Espíritu por compartir sus rodadas en bicicleta, y una disculpa a todos los que se me haya pasado mencionar. Su amistad y colaboración han sido un pilar importante durante esta etapa.

A mis padres, María del Carmen y Ricardo, a mis hermanas Dafne y Dannae, y su esposo Francisco, y mis sobrinos Ana Abigail, Carmen Naama, Ben Jedid, Lúa y Malu, por su amor, comprensión y apoyo incondicional en cada momento. Sin su confianza en mí y su aliento constante, este logro no habría sido posible.

A mi hijo Nicolás, quien ha sido el faro que me ha guiado para concluir este camino desde que llegó a nuestras vidas, y a su madre Arantxa por traerlo a mi vida.

A mis amigos y amigas, todos los "Fritos", y también a Stephanie Molina, que siempre han estado ahí para ofrecerme su compañía y palabras de aliento cuando más lo necesitaba. Su apoyo ha sido fundamental para mantener mi motivación y entusiasmo.

A todas las chicas y chicos de la Olimpiada Nacional de Astronomía 2008 y 2009.

Finalmente, agradezco al Instituto de Astronomía de la UNAM por facilitar los recursos y el entorno adecuado para llevar a cabo mi investigación. También, quiero expresar mi gratitud a todos los participantes y colaboradores de este estudio por su tiempo y disposición.

A todos ustedes, muchas gracias por haber contribuido de manera significativa a este logro. Esta tesis es tanto mía como suya.

Ricardo Adán Cortés Martín

Índice general

Agradecimientos **v**

1. Introducción **1**
1.1. Panorama general de anomalías gravitacionales 1
1.2. El régimen de las Estrellas Binarias Abiertas 3

2. Retando una predicción Newtoniana **7**
2.1. Selección de muestras 7
2.2. Resultados de las Binarias Abiertas de Gaia 10

3. Binarias abiertas como prueba de T.G. **15**
3.1. Selección inicial de la muestra 15
3.2. Remoción de las fuentes de contaminación cinemática 22
3.3. Comparación con resultados previos 27
3.3.1. Hernandez et al., 2019 27
3.3.2. Clarke, 2020 28
3.3.3. Pittordis y Sutherland, 2019 29

4. Conclusiones **31**

A. Challenging a Newtonian prediction though Gaia wide binaries **37**

B. Internal kinematics of *Gaia* eDR3 wide binaries **57**

Bibliografía **73**

Índice de figuras

1.1. Diagrama fase de distancia R(pc) vs. masa $M(M_\odot)$. La línea verde $r = \left(\frac{GM}{a_0}\right)$ representa el radio en el cual las órbitas circulares tienen una aceleración centrípeta igual a la aceleración crítica $a_0 = 1.2 \times 10^{-10}$m/s. Ésta separa el diagrama en dos regiones: del lado izquierdo, las aceleraciones son mayores a a_0 (Régimen Newtoniano), mientras que del lado derecho son menores a a_0 (Régimen MoND/Materia Oscura). Es en ésta última donde se localizan las Anomalías Gravitacionales mencionadas, donde se requiere invocar la presencia de Materia Oscura desde una perspectiva gravitacional clásica. Las líneas horizontales en esta región corresponden a velocidades de rotación constantes, con $v_{TF} = (GMa_0)^{1/4}$. La línea roja diagonal representa el radio en el que la velocidad de rotación orbital es igual a la de la luz, que coincide con el Radio de Schwartzchild $r_s = \frac{2GM}{c^2}$, y delimita el Horizonte de Eventos para Agujeros Negros sin rotación. La línea punteada paralela representa el radio en el que la velocidad de rotación orbital es 0.01c, y comienzan a ser importantes los Efectos Relativistas. Los trapecios representan el rango de masas y distancias de los distintos sistemas astrofísicos conocidos hasta la fecha. Los sistemas de interés en este trabajo, las Binarias Abiertas, abarcan tanto el Régimen Newtoniano como el Régimen MoND/Materia Oscura, convirtiéndolos de manera natural en objetos ideales para sondear las predicciones Newtonianas y de Gravedad Modificada. 6

2.1. Comparación de los datos de movimientos propios en ascención recta (α) para cada una de las dos componentes de las binarias estudiadas, entre *Hipparcos* (Shaya y Olling, 2011) y Gaia DR2. La concordancia con la línea de identidad en la mayoría de los casos muestra que han sido identificados exitosamente del primer catálogo a la muestra de Gaia DR2. 9

2.2. Comparación de los datos de movimientos propios en declinación (δ) para cada una de las dos componentes de las binarias estudiadas, entre *Hipparcos* (Shaya y Olling, 2011) y Gaia DR2. La concordancia con la línea de identidad en la mayoría de los casos muestra que han sido identificados exitosamente del primer catálogo a la muestra de Gaia DR2. 9

2.3. Comparación de los datos de paralaje para cada una de las dos componentes de las binarias estudiadas, entre *Hipparcos* (Shaya y Olling, 2011) y Gaia DR2. La discordancia en un puñado de las estrellas permite excluir a los pares, que corresponden a los esperados $\sim 10\,\%$ de estrellas mal identificadas desde el catálogo original de Shaya y Olling, o bien, al ubicarlas desde el catálogo *Hipparcos* hacia Gaia DR2. 11

2.4. Velocidades relativas unidimensionales para la muestra final de binarias, mostrando los resultados tanto de utilizar sólo la ascención recta, como sólo la declinación, con sus barras de error correspondientes. 11
2.5. La curva sólida muestra la Raíz Cuadrática Media (RCM) para la velocidad relativa unidimensional entre los componentes de una binaria de la Vecindad Solar actual como función de la separación proyectada, para la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine, 2010. La misma cantidad para el catálogo de estrellas binarias de Shaya y Olling, esta vez utlilizando datos de Gaia DR2, mostrada con barras de error. Los círculos representan los datos de la ascención recta, y los triángulos la delcinación. Un pequeño desplazamiento artificial horizontal se introdujo en ambos conjuntos de datos por claridad, para evitar el encimado de las barras de error. La inconsistencia entre los datos observados y la predicción Newtoniana es obvia, para separaciones mayores a 7000 UA, donde se espera que las aceleraciones caigan por debajo de a_0. Este límite se muestra por medio de la línea punteada vertical. 12

3.1. Gráfica de todo el cielo de los 800,000 pares binarios del catálogo Gaia eDR3 que satisfacen nuestros criterios iniciales en un radio de 330 pc del Sol (ver texto). La presencia de grupos y asociaciones cercanas, así como de campos muy poblados a lo largo del disco galáctico son evidentes. . . . 16
3.2. Gráfica de todo el cielo de los 169 540 candidatos binarios restantes después de remover todos los candidatos donde la estrella secundaria también fue originalmente seleccionada como primaria o secundaria en algún otro par binario. Las binarias restantes tienen una cociente de señal a ruido en el paralaje menor a 5. La remoción de todos los grupos locales, así como de campos atestados a lo largo del disco galáctico es evidente. . . . 17
3.3. Gráfica del cielo completo de todos los 5 844 pares binarios de la 3.2 con mediciones de velocidad radial tanto para primarias como secundarias. . 18

3.4. **Izquierda(a)**:Diagrama color-magnitud para todas las 5 736 estrellas de los 2 868 pares binarios mostrados en la figura 3.3, también con velocidades radiales relativas entre las dos componentes < 4 km/s y señal a ruido en movimientos propios para Ascención Recta y Declinación para ambas componentes > 40, como puntos negros, y los puntos grises representando las 169,540 estrellas de la figura 3.2. La exclusión de pares binarios con sólo enanas blancas, pares mezclados con enanas blancas y secuencia principal, y las estrellas de bajo brillo con alto ruido es evidente. **Derecha(b)**: Raíz cuadrática media agrupada de la distribución de velocidades relativas unidimensionales entre los miembros de los 2 474 pares binarios mostrados en el panel izquierdo de esta figura, también con velocidad radial relativa < 4 km/s y una señal a ruido en ambas cantidades > 0.3, como función de las separaciones proyectadas en dos dimensiones entre los miembros de cada par, para las distintas mediciones en A.R. y Dec. con líneas discontinuas y punteadas, respectivamente, con errores relativos promedio para ambas cantidades de 10.77 y 11.85, respectivamente. Cada par binario también aparece como un par de puntos en una separación fija, para sus correspondientes velocidades relativas en A.R. y Dec. La línea sólida representa la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine, 2010 para la misma cantidad. 19

3.5. **Izquierda(a)**: La figura es análoga al panel izquierdo de la figura 3.4, pero sólo contiene como puntos negros las 3 700 estrellas de los 1850 pares binarios restantes tras incluir otro corte de distancia heliocéntrica menor a 130 pc, resultando en una significativa reducción en la cantidad de binarias fotométricas. **Derecha(b)**: La figura es análoga al panel derecho de la figura 3.4, pero esta vez sólo contiene 1642 pares binarios tras el corte de distancia descrito arriba. Los errores relativos promedio para las diferencias de velocidad en A.R y Dec. son de 13.17 y 15.01, respectivamente. 21

3.6. **Izquierda(a)**: La figura es análoga al panel izquierdo de la figura 3.4, pero sólo contiene como puntos negros 2 016 estrellas de los 1 030 pares binarios tras la inclusión de un corte para RUWE < 1.2, resultando en una casi completa exclusión de binarias fotométricas y una reducción significativa en la cantidad de estrellas post turn-off. **Derecha(b)**: La figura es análoga al panel derecho de la figura 3.4, pero esta vez sólo contiene 929 pares binarios tras el corte calidad descrito arriba. Los errores relativos promedio para las diferencias de velocidad en A.R y Dec. son de 14.39 y 15.88, respectivamente. 22

3.7. **Izquierda(a)**: La figura es análoga a la Fig. 3.6(a), pero solamente contiene como puntos negros 888 estrellas de los 444 pares binarios tras la inclusión de una selección estricta de color-magnitud, como se muestra en esta figura, restringiendo la muestra a la región más limpia identificada por Penoyre et al., 2020 en términos de una ausencia casi completa de contaminación cinemática. Cualquier par binario donde cualquiera de sus componentes se sale de la región seleccionada es removido. **Derecha(b)**: La figura es análoga a la Fig. 3.6(b), pero esta vez contiene solamente 423 pares binarios, tras el corte de calidad descrito. Los errores relativos promedio para las diferencias de velocidades en ascención recta y declinación son de 14.88 y 18.62, respectivamente. 25

3.8. **Izquierda(a)**: Este panel muestra el promedio por clases de velocidades relativas en 1D contra escalamientos de masas binarias para los pares con separaciones < 0.009pc en la Fig.3.7(b), donde cada binaria contribuye con dos puntos, uno para A.R. y otra para Dec. Los errores promedio relativos para las diferencias de velocidades en A.R. y Dec. son de 18.36 y 23.56, respectivamente. Una ajuste de ley de potencias para este escalamiento da $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.52\pm0.14}$ **Derecha(b)**: Este panel es análogo al del lado izquierdo, pero para separaciones > 0.009pc. Los errores relativos promedio para las las diferencias de velocidades en A.R. y Dec. son de 6.85 y 7.24, respectivamente. El ajuste de ley de potencias para este escalamiento en este caso da $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$ 26

A Silvestre, por mostrarme que la magia existe...

Capítulo 1

Introducción

1.1. Panorama general de anomalías gravitacionales

En el contexto de la astrofísica actual, se han detectado y son bastante conocidas una serie de anomalías gravitacionales en varios sistemas a diferentes escalas, desde las galaxias enanas esferoidales, hasta las escalas cosmológicas. Se consideran anómalas debido a que la cinemática observada en estos sistemas no corresponde con las predicciones de la Teoría de la Relatividad General, ni con su aproximación para bajas velocidades y energías, tradicionalmente conocida como Ley de Gravitación Universal de Newton (de aquí en adelante mencionada como gravitación Newtoniana), si se considera solamente la materia detectable por medio de las técnicas astronómicas conocidas, en las distintas longitudes de onda conocidas, conocida como *materia bariónica*. Dichas anomalías se pueden resumir de la siguiente manera:

1. La pérdida de la dependencia con la distancia para velocidades de equilibrio a partir de algún radio dado en sistemas soportados por rotación (galaxias espirales).

2. Escalamiento de las velocidades de equilibrio con la raíz cuarta de la masa bariónica total del sistema en cuestión (relación Tully-Fisher).

3. Existencia de una transición desde un régimen donde, por sí misma, la materia observada explica adecuadamente las observaciones cinemáticas a través de la gravitación Newtoniana (régimen Newtoniano), hasta la región anómala, que coincide con una aceleración menor a un valor crítico $a = a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10}$ m/s^2.

Las primeras dos de las propiedades mencionadas son por supuesto el muy conocido aplanamiento y la relación Tully-Fisher bariónica de curvas de rotación de galaxias de tipo tardío, que pueden ser resumidas como $V_{TF} = 0.35(M/M_\odot)^{1/4}$ km/s (McGaugh et al., 2000), y que han sido recientemente extendidas a los perfiles de dispersión de velocidades asintóticamente planos para una variedad de sistemas soportados por presión, tales como cúmulos globulares (por ejemplo Scarpa, Marconi y Gilmozzi, 2003, Hernandez y Jiménez, 2012, Hernandez y Lara-D I, 2020) y galaxias elípticas (por ejemplo, Jiménez et al., 2013, Durazo et al., 2018, Chae et al., 2020a), que también muestran un escalamiento con la raíz cuarta de la masa bariónica total.

Las últimas tres propiedades descritas arriba forman la base de MoND (Milgrom, 1984), como alternativa al postulado de la materia oscura, donde cualquier transición subyacente en la estructura de la Física se propone como el mecanismo causal detrás

de las anomalías gravitacionales, y forma también el pilar central de un gran espectro de teorías de gravedad modificada inspiradas por MoND, apuntando a una explicación en la ausencia de la hipótesis de materia oscura. Ejemplos de ellos son los trabajos de Bekenstein, 2004, Moffat y Toth, 2008, Zhao y Famaey, 2010, Capozziello y de Laurentis, 2011, Verlinde, 2017, Barrientos y Mendoza, 2018, McCulloch y Lucio, 2019 y Hernandez et al., 2019.

En la dinámica de las galaxias, el rango de sistemas sobre los cuales las anomalías gravitacionales aparecen en el régimen de bajas aceleraciones, se extiende a lo largo de vastas escalas astronómicas. Las galaxias enanas de ultra bajo brillo superficial (dSph), con radios de escala del orden de unas pocas decenas de parsecs, muestran dispersiones de velocidad que implican coeficientes de masa luminosidad Newtoniana en el orden de cientos o incluso miles de $M_\odot/L\odot$(Koposov et al., 2015). Las enanas esferoidales típicas poseen tamaños del orden de 1 kpc y coeficientes de masa luminosidad derivados de la cinemática estelar observada, que son inconsistentes con aquellos de las poblaciones estelares desnudas bajo la gravitación estándar, por bastante más de un orden de magnitud (Salucci et al., 2012). Esta situación refleja lo que se observa en las galaxias espirales a decenas de kpc, donde las curvas de rotación (Lelli, McGaugh y Schombert, 2017) muestran de nuevo una dinámica no correspondiente con la Newtoniana, dado el contenido de materia determinado empíricamente. Esta tendencia ha sido extendida recientemente para incluir a las galaxias elípticas observadas hasta sus regiones externas de baja aceleración por Durazo et al., 2018, e inclusive para el caso de cúmulos globulares galácticos, los perfiles de dispersión de velocidades sugieren un cambio más allá de la dinámica Newtoniana para bajas aceleraciones (Scarpa, Marconi y Gilmozzi, 2003; Scarpa et al., 2011).

Empíricamente, las anomalías gravitacionales mencionadas se pueden describir por medio de la dinámica MoNDiana (Milgrom, 1984; Sanders y McGaugh, 2002), donde por debajo de un límite de aceleración de $a_0 = 1.2 \times 10^{-10}$m s^{-2} la cinemática deja de seguir la expectación Newtoniana de $v \propto R^{-1/2}$, para aplanarse en los valores de Tully-Fisher $V_{TF} = (GMa_0)^{1/4}$ para velocidades en equilibrio centrífugo, o bien, en la dispersión de velocidades correspondiente para los sistemas soportados por presión, donde M es la masa bariónica total del sistema en cuestión. En la Figura 1.1, se ilustra esta situación, en la que dependiendo de la velocidad rotacional correspondiente a una órbita circular en la que un objeto de prueba estaría sometida en de los diferentes sistemas soportados por gravedad, podemos distinguir de manera general tres diferentes regiones:

- **Régimen Newtoniano**. En este régimen, los sistemas en órbitas circulares se encuentran a velocidades que corresponden a una aceleración centrípeta $a > a_0$. En este caso, la explicación clásica Newtoniana, que predice órbitas keplerianas, es consistente con las observaciones, en sistemas con masas desde escalas planetarias ($M \lessapprox 1M_\odot$), hasta las partes internas de cúmulos de galaxias ($M \gtrapprox 10^{14}M_\odot$). En este régimen no es necesario introducir correcciones relativistas para describir la dinámica de los objetos.

- **Régimen Relativista**. En este régimen, los sistemas en órbitas circulares se encuentran a velocidades que no sólo corresponden a una aceleración centrípeta $a > a_0$, sino que también las velocidades circulares comienzan a acercarse a aquella de la velocidad de la luz ($v \gtrapprox 0.01c$). En este caso, la explicación clásica Newtoniana ya no es suficiente para describir la dinámica observada, y es necesario considerar las

predicciones de la Teoría de la Relatividad General. Los ejemplos van desde órbitas muy cercanas a las estrellas, como la precesión orbital del planeta Mercurio alrededor del Sol, hasta la cercanía a agujeros negros de masas estelares, e inclusive la vecindad de agujeros negros supermasivos ($M \gtrsim 10^{12} M_{\odot}$). Cabe mencionar que conforme el radio de las órbitas disminuye, existe un límite que coincide con el Radio de Schwartzchild, para el cual la velocidad orbital es igual a c, y por lo tanto, cruza el Horizonte de Eventos de los Agujeros Negros.

- **Régimen de bajas aceleraciones.** En este régimen, la aceleración centrípeta correspondiente a las órbitas circulares corresponde con una aceleración $a < a_0$. Fenomenológicamente, aquí es donde se han encontrado los sistemas que entran en discrepancia con la caída de las curvas keplerianas. Es en estos sistemas donde tradicionalmente se invoca la presencia de halos dominantes de un componente hipotético de materia oscura, todavía no detectado, presente en los sistemas astrofísicos observados de un amplio rango de masas y tamaños, yendo desde galaxias enanas esferoidales y cúmulos globulares, hasta cúmulos de galaxias.

Es por esto, que es de interés estudiar el Régimen Mondiano/Materia Oscura, que también llamamos Régimen de Bajas Aceleraciones, ya que al ser estos los sistemas que exhiben anomalías gravitacionales, aportan una fuente observacional en la que se pueden estudiar las diferentes teorías que buscan explicar dichas anomalías.

1.2. El régimen de las Estrellas Binarias Abiertas

Los pares de Binarias Abiertas en la vecindad solar ofrecen una oportunidad para sondear la dinámica a bajas aceleraciones en las escalas astrofísicas más pequeñas. En principio, pueden otorgar restricciones cruciales en la estructura de la gravedad a bajas aceleraciones, y a escalas donde la presencia de materia oscura no es esperada. Para las binarias de una masa solar, las aceleraciones serán por debajo de a_0 bajo las expectativas Newtonianas, a partir de separaciones de $3.4 \times 10^{-2} pc$ ($7000 UA$). Un primer intento en esta dirección fue realizado por Hernandez, Jiménez y Allen, 2012, utilizando el catálogo de Shaya y Olling, 2011, que consiste en una muestra cuidadosamente seleccionada de las Binarias Abiertas en *Hipparcos*. Este catálogo incluye un modelo completamente bayesiano y el uso de la densidad en espacio fase de cinco dimensiones (tres espaciales y dos velocidades en el plano del cielo) para identificar a los candidatos a Binarias Abiertas, y asigna rigurosamente una probabilidad de que cada candidato forme un sistema físico, en vez de ser resultado de alineaciones al azar.

Reteniendo una muestra de binarias de Shaya y Olling, 2011 donde la contaminación se limitó a menos del 10 %, en el trabajo de Hernandez, Jiménez y Allen, 2012 los resultados indicaban velocidades relativas para los pares binarios estudiados por encima de las expectativas Newtonianas para aceleraciones por debajo de a_0. Esto se sigue cumpliendo inclusive después de tomar en cuenta efectos de proyección, las distribuciones de elipticidad y la disrupción y evolución de binarias ionizadas debido al efecto del campo de marea de la Galaxia y encuentros con estrellas de campo y remanentes estelares, como se modela en el trabajo de Jiang y Tremaine, 2010, y a pesar de los relativamente grandes errores en los movimientos propios, presentes en el catálogo de *Hipparcos*.

Por otro lado, Scarpa et al., 2017 exploran el problema utilizando una muestra pequeña de 60 candidatos a Binarias Abiertas, con separaciones proyectadas entre 0.004pc y 1.0pc . En dicho estudio se encontró que bastantes binarias abiertas son capaces de sobrevivir las fuerzas de marea galácticas y encuentros estelares del ambiente dinámico de la vecindad solar con una pequeña submuestra de los pares más abiertos, mostrando una cinemática más consistente con la dinámica MoNDiana que con la Newtoniana. Más recientemente, estudios teóricos de Pittordis y Sutherland, 2018 y Banik y Zhao, 2018 confirmaron que los datos de Gaia, en términos de los números esperados de binarias abiertas detectadas y los intervalos de confianza para los movimientos propios y paralajes relevantes, son suficientes para detectar desviaciones de la dinámica Newtoniana a partir del régimen de bajas aceleraciones sondeado por estos sistemas, de estar presentes.

Más recientemente, Clarke, 2020 muestra que la presencia de terciarias mezcladas, es decir, aquellos casos en los que una o ambas componentes de la binaria observada son en realidad binarias muy cercanas, con una de las componentes no detectadas, resultarían en una contaminación cinemática, inflando las velocidades relativas inferidas en el supuesto sistema binario a grande escala. Así mismo, el estudio muestra que una distribución de separaciones y masas razonables de componentes terciarios sin detectar podría ser invocada para dar cuenta de los resultados obtenidos. Es de interés hacer notar que tal distribución de terciarias no detectadas debería ser visible a través de una serie de efectos, e.g. Manchanda, Sutherland y Pittordis, 2023.

Para compañeras estelares relativamente brillantes, la posición de la estrella observada en un diagrama de Hertzsprung-Russell se moverá hacia magnitudes más brillantes, al igual que con binarias espectroscópicas estándar, mientras que para compañeras suficientemente atenuadas (esencialmente materia oscura estelar), la contaminación cinemática que infla la cinemática de las binarias detectadas (el bamboleo inducido en la componente afectada de la binaria) se hará visible a través de la calidad del ajuste de la solución de una estrella (single star solution). En más detalle, Penoyre et al., 2020 muestran que las compañeras no resueltas en el catálogo de Gaia DR2 resultan en ajustes, suponiendo estrellas individuales, muy pobres, valores de RUWE (Renormalized Unit Weight Error) mayores a 1.4, extendiéndose hasta 10 e inclusive más. Además, identifican las regiones del diagrama H-R donde las componentes estelares no resueltas son prominentes, y aquellas donde están mayormente ausentes.

El primer paso consiste en reproducir el procedimiento cuidadoso y detallado presentado en Shaya y Olling, 2011, pero utilizando esta vez el catálogo de Gaia DR2. Este laborioso enfoque, en última instancia dará una respuesta definitiva sobre la presencia de anomalías gravitacionales a escalas estelares en el régimen de bajas aceleraciones, pero por lo pronto está limitado por nuestra comprensión incompleta de los problemas todavía presentes en los datos del muy reciente Gaia DR2. Por ejemplo, sólo alrededor de dos tercios de las fuentes de *Hipparcos 2* tienen su contraparte en Gaia DR2. Además, Gaia trata a todas las binarias más cercanas a $1''$ como una sola fuente (según la diferencia de magnitud), lo cual puede producir paralajes anómalos, y las soluciones de paralaje pueden ser más propensas a duplicidades en ciertas áreas, etc. (consultar Gaia Collaboration et al., 2018, A1 para ver los problemas conocidos).

Un muestreo a primer orden de este problema puede ser sondeado de manera más directa al aprovechar la correspondencia entre los catálogos de Gaia e *Hipparcos*. Uno puede tomar la selección de muestras del análisis bayesiano preciso en Shaya y Olling,

2011, y los datos astrométricos actuales de Gaia DR2. Aquí, presentamos los resultados de dicha aproximación, resultando en una pequeña muestra de 81 Binarias Abiertas del catálogo original de Shaya y Olling, 2011, con una probabilidad menor al 10 % de ser asociaciones al azar, con datos de Gaia DR2 consistentes con las cantidades originales de *Hipparcos*, y con paralajes concordantes para ambos componentes en Gaia DR2. Aunque sólo sea una muestra reducida, la calidad superior del satélite Gaia hace posible inferir las velocidades relativas para las binarias en cuestión a un grado mucho mayor de precisión que lo que fue posible para Hernandez, Jiménez y Allen, 2012. Curiosamente, los nuevos resultados muestran una desviación de las predicciones Newtonianas conforme las separaciones proyectadas van más allá de la separación crítica de 0.034 pc. De hecho, los nuevos resultados son consistentes con lo que se reportó anteriormente por Hernandez, Jiménez y Allen, 2012, y los valores promedio de las velocidades relativas inferidas se ven esencialmente iguales, con las barras de error mostrando una reducción dramática. Esto descarta de manera efectiva la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine, 2010, y provee evidencia sólida de una anomalía gravitacional en el régimen de bajas aceleraciones, pero esta vez a escalas estelares.

Como siguiente paso, utilizamos el catálogo reciente de Gaia eDR3 (Gaia Collaboration et al., 2021) (Lindegren et al., 2021) para construir una muestra grande de 5,844 binarias abiertas localmente aisladas, teniendo velocidades radiales de alta calidad, paralajes, colores, magnitudes y movimientos propios, para construir una imagen detallada de las velocidades relativas en el plano del cielo, ΔV, como función de la separación 3D y de la masa binaria total, M_b, siendo ésta última inferida a través de las estimaciones precisas de secuencia principal a partir de la magnitud G absoluta de Pittordis y Sutherland, 2019. La muestra inicial es entonces depurada cuidadosamente para minimizar todas las fuentes de contaminación cinemática discutidas hasta la fecha, con el uso de separaciones 3D entre las dos componentes, eliminando cualquier efecto de proyección, un límite superior del parámetro RUWE muy estricto (menor de 1.2) para poder excluir terciarias mezcladas de periodo corto, cortes de velocidades radiales relativas para remover la contaminación de estrellas no ligadas de la distribución local media, y una selección detallada de las regiones del diagrama H-R para excluir la presencia de compañeras estelares no resueltas, restringidas sólo a la selección más limpia de estrellas de Secuencia Principal, siempre para ambas componentes de la binaria. Los resultados son consistentes con expectativas Newtonianas, tanto en masa como en escalamientos de velocidad relativa para bajas separaciones, correspondientes al régimen de altas aceleraciones, pero es reminescente de los escalamientos tipo Tully-Fisher para el régimen de bajas aceleraciones de las separaciones de las binarias abiertas.

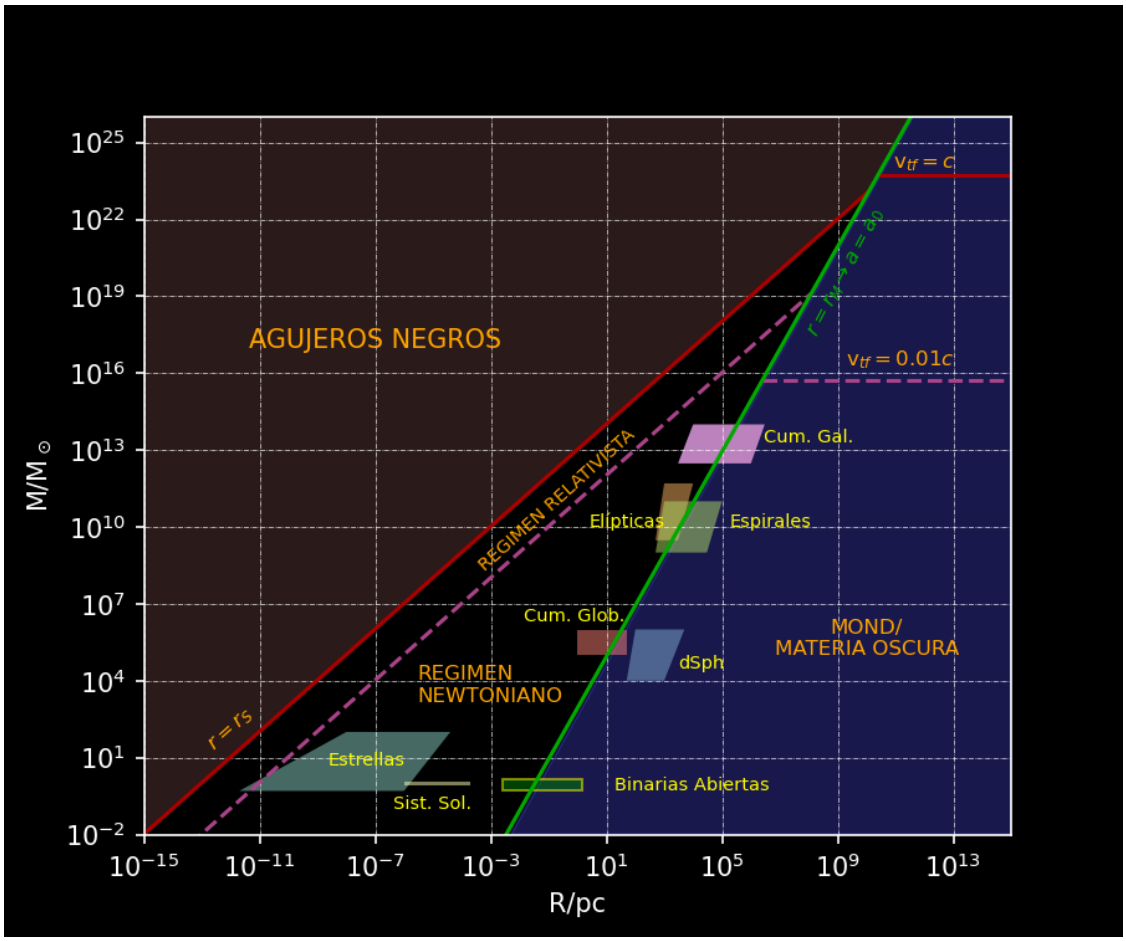

FIGURA 1.1: Diagrama fase de distancia R(pc) vs. masa $M(M_\odot)$. La línea verde $r = \left(\frac{GM}{a_0}\right)$ representa el radio en el cual las órbitas circulares tienen una aceleración centrípeta igual a la aceleración crítica $a_0 = 1.2 \times 10^{-10}$m/s. Ésta separa el diagrama en dos regiones: del lado izquierdo, las aceleraciones son mayores a a_0 (Régimen Newtoniano), mientras que del lado derecho son menores a a_0 (Régimen MoND/Materia Oscura). Es en ésta última donde se localizan las Anomalías Gravitacionales mencionadas, donde se requiere invocar la presencia de Materia Oscura desde una perspectiva gravitacional clásica. Las líneas horizontales en esta región corresponden a velocidades de rotación constantes, con $v_{TF} = (GMa_0)^{1/4}$.

La línea roja diagonal representa el radio en el que la velocidad de rotación orbital es igual a la de la luz, que coincide con el Radio de Schwartzchild $r_s = \frac{2GM}{c^2}$, y delimita el Horizonte de Eventos para Agujeros Negros sin rotación. La línea punteada paralela representa el radio en el que la velocidad de rotación orbital es 0.01c, y comienzan a ser importantes los Efectos Relativistas.

Los trapecios representan el rango de masas y distancias de los distintos sistemas astrofísicos conocidos hasta la fecha. Los sistemas de interés en este trabajo, las Binarias Abiertas, abarcan tanto el Régimen Newtoniano como el Régimen MoND/Materia Oscura, convirtiéndolos de manera natural en objetos ideales para sondear las predicciones Newtonianas y de Gravedad Modificada.

Capítulo 2

Retando una predicción Newtoniana usando binarias abiertas de Gaia

2.1. Selección de muestras

Como se dijo en la introducción, la selección de muestras en este capítulo está basada en el catálogo de binarias abiertas de Shaya y Olling, 2011, el cual se construyó utilizando un procedimiento bayesiano muy detallado. Éste identifica y cuantifica la probabilidad de cada par binario de ser un sistema físico real, en vez de el resultado de efectos de proyección o una asociación al azar, incluyendo también los catálogos de *Tycho-2* y *Tycho* de estrellas dobles (Høg et al., 2000 y Fabricius et al., 2002, respectivamente). Para este fin, se correlacionó el espacio fase de 5 dimensiones de posiciones y movimientos propios, junto con una biblioteca de densidad del espacio fase galáctico, excluyendo explícitamente los cúmulos locales más grandes conocidos, para identificar candidatos a binarias abiertas como sobredensidades locales significativas en el espacio fase. Las correciones debidas a las proyecciones esféricas también se consideraron para así poder obtener un catálogo de 840 binarias abiertas con separaciones proyectadas de entre 0.003 y 10 pc y, de manera crucial, una probabilidad de asociación al azar bien determinada P_{ch}. Tomando únicamente aquellos pares donde esta probabilidad satisfizo la condición $P_{ch} < 10\,\%$ reduce la muestra original de Shaya y Olling, 2011 a solamente 359 binarias abiertas. Este catálogo también se encuentra bastante restringido en el tipo espectral tanto para primarias como secundarias de cada binaria, dando como resultado estrellas en un estrecho rango de masas centrado en $0.5M_{\odot}$. Esto último es importante, ya que permite una comparación limpia con las simulaciones de binarias de masa fija de Jiang y Tremaine, 2010 (ver abajo). Siguiendo la terminología original de Shaya y Olling, 2011, la estrella más brillante en cada sistema es la primaria.

El criterio de búsqueda de Shaya y Olling asegura la ausencia de vecinos cercanos, y resulta en candidatos binarios con separaciones que siempre son muchas veces menores que las separaciones interestelares típicas en la ubicación de las binarias en cuestión. Pruebas extensivas con muestras sintéticas en Shaya y Olling garantizan que el catálogo incluya muy pocos sistemas múltiples con compañeras adicionales no detectadas y es altamente completo en el rango de distancias heliocéntricas de 6 a 100 pc.

Después, utilizamos la ventaja de la disponibilidad de la correspondencia entre *Hipparcos* y Gaia DR2 para buscar los datos astrométricos actualizados de la muestra de 359 binarias abiertas de Shaya y Olling con $P_{ch} < 10\,\%$ dentro de Gaia DR2. La búsqueda devuelve sólo 151 pares, donde cada componente de las binarias en Shaya y Olling aparece en Gaia DR2 con ambos componentes de movimiento propio y paralaje. Este resultado

es de esperarse, ya que sólo alrededor de dos tercios de las fuentes de *Hipparcos 2* tienen su contraparte en Gaia DR2 (Marrese et al., 2019). No es claro todavía por qué hay tantas fuentes faltantes. De acuerdo con los autores citados puede haber una serie de efectos combinados presente. Como cada par binario es excluído si alguna de las componentes no aparece en Gaia DR2, la fracción final de estrellas es la esperada. Después, el catálogo de Shaya y Olling da algunos sistemas en los cuales más de una secundaria es identificada como la compañera para una primaria dada, y además algunos casos donde una misma secundaria es idenficada como compañera de más de una primaria. Removemos todos estos casos de identificaciones múltiples, quedando sólo 131 pares en la muestra.

Una prueba preliminar de la confiabilidad con la cual las binarias de *Hipparcos* fueron identificadas en el Gaia DR2, proviene de hacer la comparación de los movimientos propios reportados por Shaya y Olling con las mediciones correspondientes reportadas en Gaia DR2. Esto se muestra en las figuras 2.1 y 2.2, donde los rangos mostrados en los ejes fueron elegidos para mostrar con mayor claridad la mayor parte de nuestra muestra. Un manojo de sistemas demasiado discordantes fue removido de las gráficas, ya que se encuentran demasiado lejos de la línea de identidad mostrada. Es claro que en la mayoría de los casos, los valores de movimientos propios reportados por ambos satélites están en concordancia el uno con el otro, dentro de sus respectivos intervalos de confianza, donde los errores más grandes corresponden a *Hipparcos*, y son mucho mayores que los de Gaia DR2. Aún así, se introdujo un corte para remover de nuestras consideraciones cualquier candidato a binaria donde la diferencia entre alguna de las componentes de movimientos propios entre *Hipparcos* y Gaia DR2 es mayor a 3σ. Nuestros resultados finales no son sensibles a este límite, tomando en cuenta que las pocas binarias mal identificadas fueron removidas. Este corte nos deja con solamente 117 pares de estrellas binarias.

Después, como se muestra en la figura 2.3, podemos comprobar que las mediciones de las paralajes reportadas en Gaia DR2 sean consistentes entre cada par de primaria-secundaria, y quitar de la muestra aquellas binarias donde las distancias no están dentro de un margen del 13 %. Este criterio de exclusión identifica 17 candidatos, reduciendo la muestra a 100 pares. Nótese que la comprobación mostrada en las figuras 2.2 y 2.3 nos dan de manera efectiva una línea de tiempo de 10 años que, además de la robustez del catálogo de Shaya y Olling contra sistemas múltiples, donde no hay velocidades radiales involucradas, sustrae cualquier binaria donde una tercer componente pudiese estar alterando los movimientos propios con escalas de tiempo más cortas que 10 años (ver por ejemplo Banik y Zhao, 2018).

Finalmente, aprovechamos las mediciones de velocidad radial (cuando están disponibles) y removemos cualquier binaria donde las diferencias de velocidades radiales ΔV_r entre ambas componentes es mayor que 4 km s^{-1}. El corte resultante no es demasiado sensible a este filtro en la diferencia de velocidades radiales, y los pares binarios descartados típicamente tienen valores de ΔV_r mucho más grandes y no concordantes, con una diferencia promedio de $\Delta V_r = 28$ km s^{-1}. Nuestra muestra final se compone de 81 pares binarios.

Por lo tanto, hemos preferido cortes muy estrictos en nuestra muestra final, que nos dejan con números muy modestos, pero garantizan poder excluir estrellas mal identificadas al ir del catálogo original de *Hipparcos* al de Gaia DR2, así como la contaminación por alineación aleatoria en el catálogo original de Shaya y Olling, todo lo cual se vuelve evidente en las comparaciones presentadas en esta sección. La Tabla 1 en Hernandez et

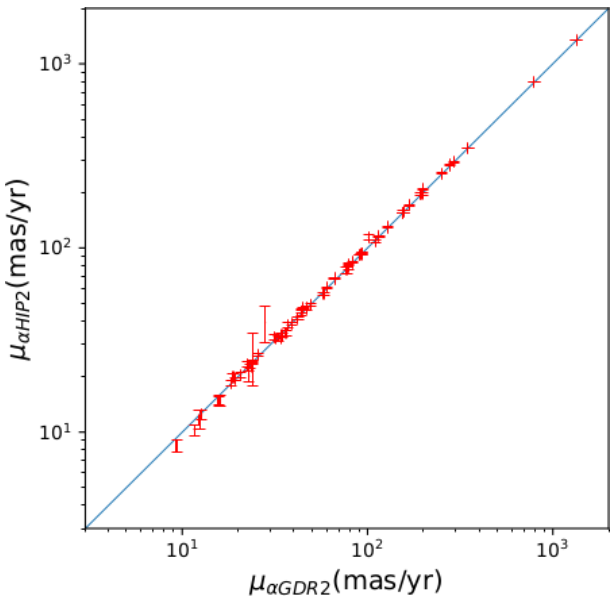

FIGURA 2.1: Comparación de los datos de movimientos propios en ascención recta (α) para cada una de las dos componentes de las binarias estudiadas, entre *Hipparcos* (Shaya y Olling, 2011) y Gaia DR2. La concordancia con la línea de identidad en la mayoría de los casos muestra que han sido identificados exitosamente del primer catálogo a la muestra de Gaia DR2.

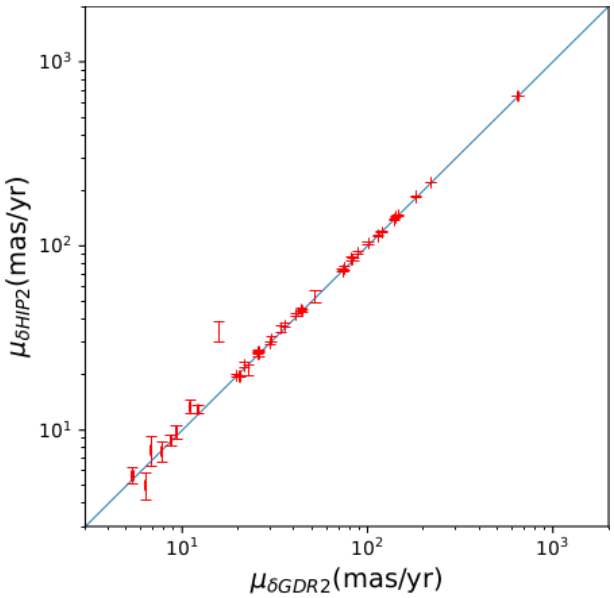

FIGURA 2.2: Comparación de los datos de movimientos propios en declinación (δ) para cada una de las dos componentes de las binarias estudiadas, entre *Hipparcos* (Shaya y Olling, 2011) y Gaia DR2. La concordancia con la línea de identidad en la mayoría de los casos muestra que han sido identificados exitosamente del primer catálogo a la muestra de Gaia DR2.

al., 2019 (ver Apéndice A) resume las propiedades utilizadas de Gaia DR2 y los números de catálogo de las primarias y secundarias utilizadas, tanto del catálogo de *Hipparcos* como de Gaia DR2, junto con los resultados de los criterios de exclusión utilizados.

2.2. Resultados de las Binarias Abiertas de Gaia

Hernandez, Jiménez y Allen, 2012 calculan la separación proyectada en el plano del cielo utilizando solamente la paralaje a la primaria de cada binaria, pero dada la mayor calidad en los datos de Gaia DR2, ahora es posible calcular la separación proyectada usando explícitamente las posiciones y paralajes de Gaia para cada una de las componentes de la binaria. La paralaje promedio entre ambas componentes es la que se utiliza para obtener la distancia a cada par. Utilizando los movimientos propios reportados por Gaia, la diferencia relativa de velocidades en una dimensión se calcula dos veces para cada binaria: la primera considerando solamente el movimiento propio en ascención recta, y la segunda considerando sólo el movimiento propio en declinación. En todos los casos, el movimiento físico relativo se calcula incluyendo todos los efectos de proyección de geometría esférica (ver por ejemplo Smart, 1968), y no bajo la mayormente utlilizada aproximación de ángulos pequeños. Esto requiere la velocidad radial de al menos una de las componentes, con lo cual contamos con 71 de los 81 pares finales. Para esos 10 pares restantes, se asumió una velocidad radial $V_r = 0$ al considerar el efecto descrito anteriormente (ver por ejemplo Shaya y Olling, 2011. Los efectos del refinamiento descrito son sólo relevantes en realidad para los pares más cercanos y abiertos, que en nuestra muestra son sólo unos cuantos sistemas, como se puede apreciar en la Tabla 1 en Hernandez et al., 2019 (ver Apéndice A).

En la figura 2.4 se observan ambas mediciones Δv_{1D} para cada par binario en la muestra final, con sus barras de error correspondientes a 1σ. Una envolvente superior clara es evidente. En la figura 2.5 se muestra la raíz media cuadrática de la diferencia de velocidad unidimensional descrita arriba, graficada contra las separaciones proyectadas en escala logarítmica, con círculos y triángulos representando la ascención recta y declinación, respectivamente. Las barras de error horizontales dan el tamaño de los registros, mientras que las barras de error verticales muestran la contribución de los errores reportados en Gaia y su propagación de errores, agregando una contribución Poissoniana, y la cual, dada la población tan pequeña en cada registro (21, 23, 17, 8 y 12, de izquierda a derecha) es la que de hecho domina la contribución del error en la mayoría de los casos. La línea punteada vertical que aparece en 7000 UA es la escala aproximada en la cual se espera que la aceleración comience a ser menor a a_0.

También se muestran en la figura 2.5 las predicciones Newtonianas para esta misma cantidad provenientes de Jiang y Tremaine, 2010, donde se modela una colección de 50,000 binarias simuladas para un rango de distribuciones de elipticidades posibles, con un seguimiento dinámico bajo expectativas Newtonianas dentro del campo de marea local Galáctico. Estas también son sujetas a los efectos de estrellas de campo y bombardeo de remanentes estelares por un periodo de 10 Gyr. Finalmente, los pares resultantes ligados y no ligados son proyectados a los largo de una línea de visión aleatoria que produce una predicción robusta para el valor de expectación de $< \Delta v_{1D}^2 >^{1/2}$ como función de Δr, representado con la línea sólida. No es difícil entender estos resultados: una tendencia de $\Delta v \propto \Delta r^{-1/2}$ es bastante aparente hasta llegar al radio de marea de este problema, correspondiente a 1.7 pc. Más allá de este punto, las binarias ionizadas

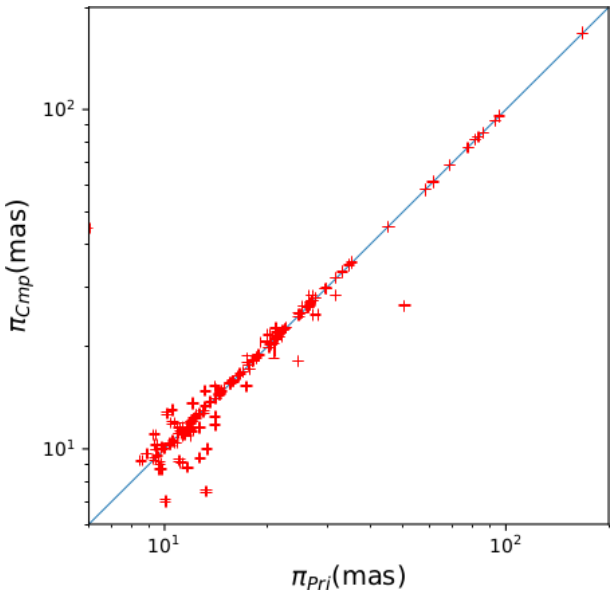

FIGURA 2.3: Comparación de los datos de paralaje para cada una de las dos componentes de las binarias estudiadas, entre *Hipparcos* (Shaya y Olling, 2011) y Gaia DR2. La discordancia en un puñado de las estrellas permite excluir a los pares, que corresponden a los esperados $\sim 10\,\%$ de estrellas mal identificadas desde el catálogo original de Shaya y Olling, o bien, al ubicarlas desde el catálogo *Hipparcos* hacia Gaia DR2.

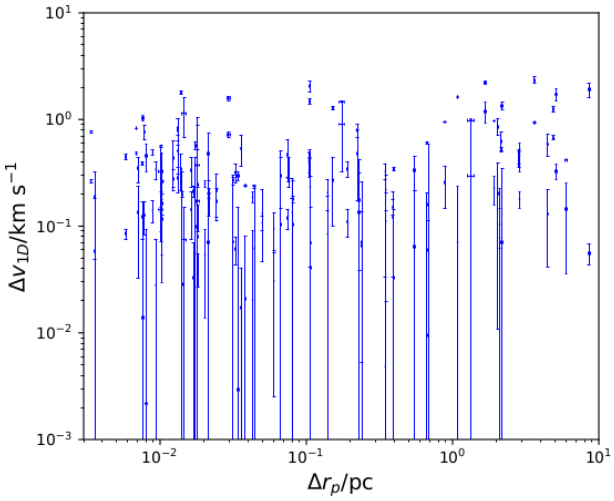

FIGURA 2.4: Velocidades relativas unidimensionales para la muestra final de binarias, mostrando los resultados tanto de utilizar sólo la ascención recta, como sólo la declinación, con sus barras de error correspondientes.

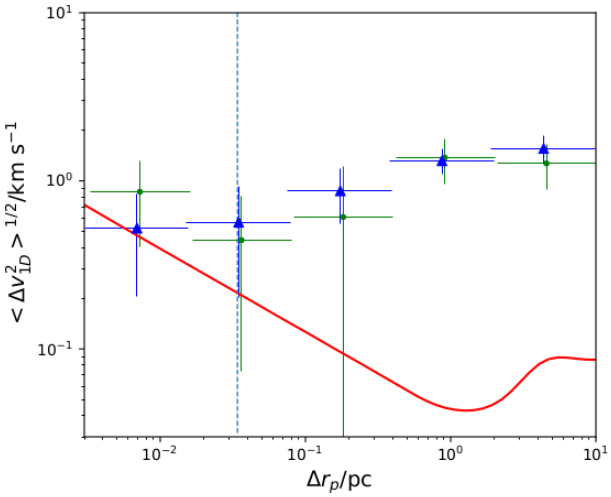

FIGURA 2.5: La curva sólida muestra la Raíz Cuadrática Media (RCM) para la velocidad relativa unidimensional entre los componentes de una binaria de la Vecindad Solar actual como función de la separación proyectada, para la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine, 2010. La misma cantidad para el catálogo de estrellas binarias de Shaya y Olling, esta vez utlilizando datos de Gaia DR2, mostrada con barras de error. Los círculos representan los datos de la ascención recta, y los triángulos la delcinación. Un pequeño desplazamiento artificial horizontal se introdujo en ambos conjuntos de datos por claridad, para evitar el encimado de las barras de error. La inconsistencia entre los datos observados y la predicción Newtoniana es obvia, para separaciones mayores a 7000 UA, donde se espera que las aceleraciones caigan por debajo de a_0. Este límite se muestra por medio de la línea punteada vertical.

continúan moviéndose en órbitas galácticas prácticamente comunes, con velocidades relativas que muestran un ligero incremento que se estabiliza a cerca de 0.1 km s^{-1}.

Es claro que, a la izquierda de la línea punteada de a_0, los resultados son consistentes dentro de los intervalos de confianza, con las expectativas Newtonianas. Sin embargo, al ir a separaciones mayores de 7000 UA, los puntos observados dejan de seguir la tendencia esperada y de hecho se estabilizan en una amplitud de Δv cercana a los valores observados en el punto a_0, reproduciendo cualitativamente la fenomenología observada en las curvas de rotación galácticas.

Este resultado de la muestra de binarias presentadas es extremadamente desafiante para un punto de vista Newtoniano, donde se espera que las velocidades relativas sean mucho menores que lo observado. Dada la construcción de la muestra de Shaya y Olling, se esperaría que las binarias con pequeñas diferencias de velocidades aparecieran como sobredensidades locales más acentuadas en el espacio fase, y el criterio de selección, si acaso, estuviese sesgado en contra de las binarias con grandes diferencias de velocidades, no contra las de diferencias pequeñas. Así pues, desde un punto de vista Newtoniano, las binarias ligadas con separaciones menores al radio de marea de 1.7 pc, y mayor que 7000 UA, están misteriosamente ausentes. También, como mencionan Oh et al., 2017, una población de binarias de asociación no aleatoria aparece a escalas por encima de 7000 UA con velocidades relativas de más de un orden de magnitud por encima de las expectativas de ligadura, con velocidades relativas de $\sim 1 kms^{-1}$ y separaciones de unos pocos pc, siendo las edades dinámicas de sistemas no ligados de solamente unos pocos 10^6 años. ¿Qué podría sostener y reponer estas poblaciones bajo un marco Newtoniano? A separaciones por debajo del radio de marea de 1.7 pc del problema, las binarias ligadas deberían aparecer, bajo el marco Newtoniano.

Además, los resultados mostrados en la figura 2.5 confirman lo que ya había sido presentado en el trabajo de Hernandez, Jiménez y Allen, 2012, aunque los datos mucho más crudos de *Hipparcos* en ese primer estudio mostraban unas barras de error significativamente mayores. El que aquellos primeros resultados hayan sido el resultado simplemente de sesgos no considerados, o simplemente por la estructura de errores en los datos de *Hipparcos* no parece muy plausible, al provenir de datos consitentes entre dos satélites completamente independientes entre sí. De hecho, las barras de error se han reducido significativamente, con los resultados centrales muy similares. Nótese también que ambas estimaciones de Δv_{1D}, utilizando o bien los movimientos propios en la ascención recta, o bien en la declinación, son consistentes unos con los otros.

Un problema potencial en la interpretación presentada proviene de la posible presencia de una población mal identificada de binarias que fueran de hecho parte de grupos móviles sueltos, en disolución. El trabajo reciente de Oh et al., 2017 muestra que, aunque las binarias abiertas aisladas dominan, un algoritmo de búsqueda como el utilizado por Shaya y Olling, 2011 también podría recoger una fracción de binarias mal identificadas que sean parte de grupos móviles más grandes, con muchos de sus miembros más débiles todavía no descubiertos. Una respuesta completa y confirmación o refutación de nuestros resultados, necesariamente requiere un estudio mucho más extensivo a través de todo el catálogo de Gaia, y una exploración y entendimiento más completos de la estructura del espacio-fase y las sobredensidades en la Vecindad Solar y el ambiente local de la Vía Láctea.

Aunque la anomalía gravitacional detectada aparece al cruzar el límite de a_0 de

MoND, este resultado es igual de inesperado en la teoría de MoND clásica, ya que en este caso debería dominar el Efecto de Campo Externo en MoND (o bien en AQUAL, ver por ejemplo Sanders y McGaugh, 2002). Dado que la aceleración orbital en la vecindad solar es más alta que la aceleración interna de las binarias en cuestión, en MoND como tal, sólo un modesto incremento en el valor efectivo de G es de esperarse (ver por ejemplo Pittordis y Sutherland, 2018). Entonces, dentro de un esquema MoNDiano, nuestros resultados implican la validez no de la versión mejor estudiada, sino de una variante en la que el Efecto de Campo Externo no aparece, o se encuentra mucho más suprimida, por ejemplo, como en Milgrom, 2011. En términos de extensiones covariantes a la Relatividad General, con una límite MoNDiano a bajas velocidades, es difícil saber hasta qué grado un Efecto de Campo Externo podría estar presente en muchas de las opciones recientemente desarrolladas (por ejemplo, las variantes f(R) revisadas en Capozziello y de Laurentis, 2011, la Gravedad Emergente de Verlinde, 2017, o la propuesta f(R,L) de Barrientos y Mendoza, 2018). Nuestros resultados sirven entonces como constricciones en términos de requerir un Efecto de Campo Externo al mínimo, al menos para las escalas de sub-parsecs en la Vecindad Solar explorada.

Capítulo 3

Binarias abiertas como una prueba de Teorías Gravitacionales

En este capítulo, pasamos al uso del catálogo de Gaia eDR3, para explorar en más detalle los resultados presentados en el tratamiento previo.

3.1. Selección inicial de la muestra

Comenzamos por utilizar la búsqueda inicial de El-Badry y Rix, 2018, quienes construyen un catálogo de binarias abiertas dentro de un radio de 200 pc del Sol, el cual es después validado a través de varias simulaciones para considerar los efectos de proyección, una distribución razonable de elipticidades y completez debido a compañeras no detectadas, con un nivel de contaminación estimado por los autores de $< 0.2\,\%$. Una extensión de la estrategia básica presentada en dicho artículo también fue utilizada por Tian et al., 2020 para construir un catálogo de más de 800 000 binarias abiertas dentro de un radio de 4 kpc del Sol, manteniendo una alta pureza para la muestra.

Nuestra búsqueda inicial en *Gaia* nos regresa todas las estrellas dentro de un radio de 200 pc, con paralajes precisos (señal a ruido > 20). La búsqueda después rastrea en un círculo proyectado de 0.5 pc alrededor de cada una de estas estrellas, en búsqueda de posibles compañeras, requiriendo también una medición precisa de paralajes (señal a ruido > 5). Cada candidato a par binario es entonces rechazado si las paralajes de ambas estrellas resultan en una diferencia de distancias a lo largo de la línea de visión de ambas componentes mayor al doble de la separación proyectada entre ellas s, a más de 3σ. Es decir, un potencial par binario debe satisfacer la condición $|\Delta d - 2s| < 3\sigma_{\Delta d}$. Al ir a distancias mayores, una fracción creciente de compañeras cerradas no sería detectado debido a la resolución fija de *Gaia*. Nuestra muestra no es completa en ningún sentido limitado por volumen, pues el requisito no es que no perdamos ningún candidato viable, sino que no incluyamos ninguno inválido. Esta búsqueda inicial nos devuelve una cantidad cercana a un millón de pares binarios potenciales, como se muestra en la figura 3.1.

Queda claro que un cierto número de agrupaciones locales bien conocidas y asociaciones han permanecido, donde las binarias abiertas no satisfacen ningún criterio de estricto aislamiento. También, las regiones altamente pobladas a lo largo del disco galáctico son evidentes. Entonces, se requiere que si alguna estrella particular aparece ya sea como primaria o secundaria en más de un candidato a par binario, todos esos pares son desechados. Esto resulta en una esfera de aislamiento de por lo menos 0.5 pc,

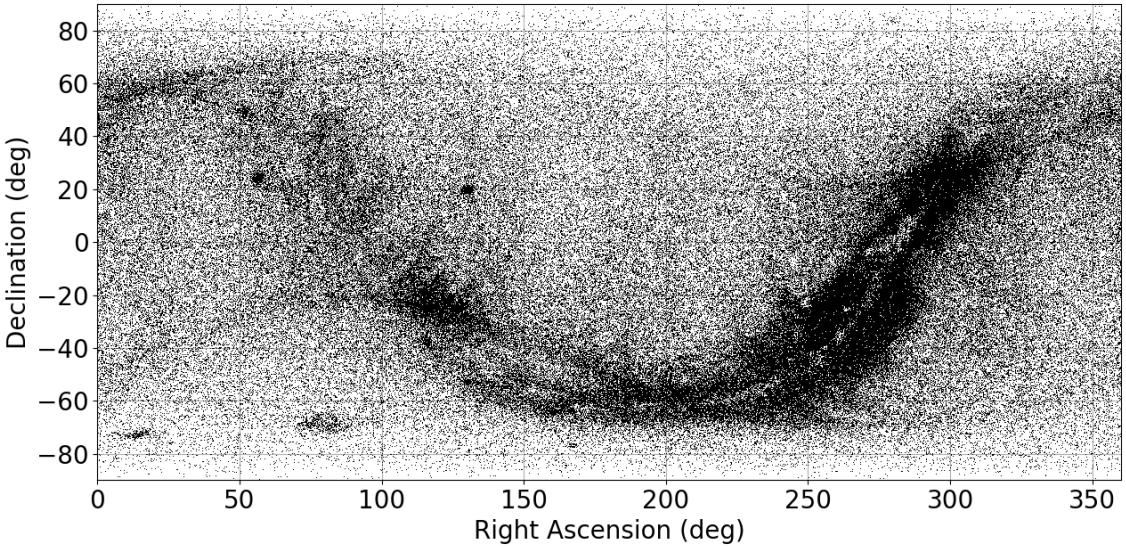

FIGURA 3.1: Gráfica de todo el cielo de los 800,000 pares binarios del catálogo Gaia eDR3 que satisfacen nuestros criterios iniciales en un radio de 330 pc del Sol (ver texto). La presencia de grupos y asociaciones cercanas, así como de campos muy poblados a lo largo del disco galáctico son evidentes.

siendo casi todos los pares binarios potenciales los que cumplen con este criterio, y permite minimizar el efecto de perturbaciones dinámicas posibles, debido a otras estrellas individuales que formen parte de la población estelar de campo. Al limitarnos a observaciones cinemáticas de binarias con separaciones proyectadas por debajo de 0.1 pc, se seleccionan estrellas sin otros vecinos cercanos con mediciones de paralaje dentro de al menos cinco veces la separación binaria. Este factor de aislamiento crece linealmente al tomar binarias más cercanas.

Después de eliminar todos los pares donde alguna de las binarias forma parte de más de un par, quedan 169 540 candidatos, mostrados en la gráfica de cielo completa de la figura 3.2. Es posible observar que los estrictos cortes aplicados remueven todos los grupos locales evidentes, así como las zonas más densamente pobladas a lo largo del disco galáctico.

Antes de examinar la distribución de velocidades relativas de candidatos binarios, se utilizaron las velocidades radiales relativas de ambas componentes para minimizar la presencia de pares no ligados al requerir que la diferencia entre las velocidades radiales de ambas componentes del par sea menor a 4 km/s. Así, se quitaron de consideración los pares en los que alguna de las componentes no tiene determinación de la velocidad radial. También, como se hace ver en El-Badry, 2019, si se ignoran los detalles de la correción esférica, el efecto geométrico puede inducir velocidades relativas espuriamente infladas, que empeoran con el aumento de s, para binarias tanto abiertas como cercanas. Aunque esta corrección sólo representa una contribución menor, el conservar solamente estrellas con observaciones de velocidades radiales permite incluir de manera completa las correcciones esféricas correspondientes (ver por ejemplo, Smart, 1968) para estimar de manera adecuada las verdaderas velocidades relativas de las binarias en esta muestra. Excluir las binarias en grupos, y aquellas con mediciones incompletas de velocidad

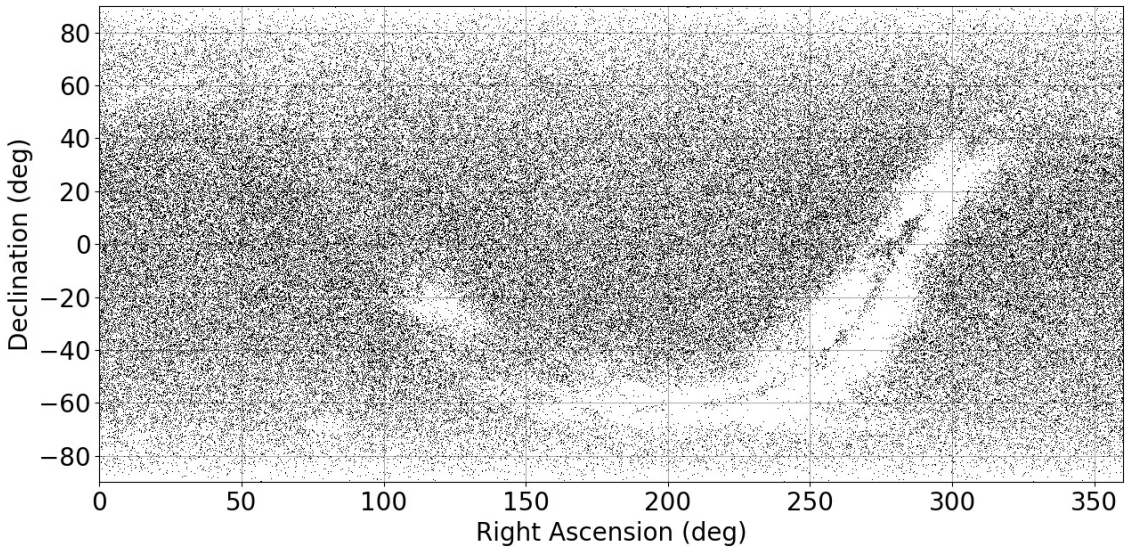

FIGURA 3.2: Gráfica de todo el cielo de los 169 540 candidatos binarios restantes después de remover todos los candidatos donde la estrella secundaria también fue originalmente seleccionada como primaria o secundaria en algún otro par binario. Las binarias restantes tienen una cociente de señal a ruido en el paralaje menor a 5. La remoción de todos los grupos locales, así como de campos atestados a lo largo del disco galáctico es evidente.

radial, remueve más del 99 % de los candidatos a pares binarios. La figura 3.3 muestra la gráfica de cielo completo con los 5 844 pares binarios restantes, una reducción muy significativa de los candidatos de la figura 3.2.

Se introdujeron dos modificaciones a la búsqueda de El-Badry y Rix, 2018: la primera fue un ligero incremento en el radio del círculo proyectado que define la búsqueda inicial, del 5×10^4 AU $= 0.25$ pc utilizado por estos autores, al 0.5 pc considerado en este trabajo, para poder explorar un rango más amplio de separaciones binarias. Finalmente, El-Badry y Rix, 2018 introducen un corte en velocidades relativas en el plano del cielo para excluir cualquier candidato potencial binario que sea inconsistente con la dinámica Newtoniana para una binaria de masa total $5M_\odot$ a 3σ. Dado que el objetivo es precisamente explorar esta región, en búsqueda de posibles velocidades relativas por encima de los valores Newtonianos, este último corte es removido.

Después, se aplican cortes de calidad muy estrictos (señal a ruido > 40) en las mediciones de movimientos propios tanto en A.R. como en Dec., para ambas componentes de cada binaria, con la finalidad de buscar una muestra pequeña pero con propiedades astrométricas muy precisas. Sólo aquellos potenciales pares binarios en los que ambas componentes aprueban los cortes de calidad de datos se retienen. Para poder minimizar la presencia de asociaciones por casualidad, resultado de pares de estrellas aleatorios provenientes de la población del campo local, introducimos el corte mencionado previamente, requiriendo que la diferencia de velocidades radiales entre ambas componentes de todos los pares binarios potenciales sea menor a 4 km/s, dejándonos con solamente 2 868 pares binarios. Este límite de velocidades relativas toma el lugar del criterio de consistencia Newtoniana en la búsqueda original, y asegura que nuestras inferencias de

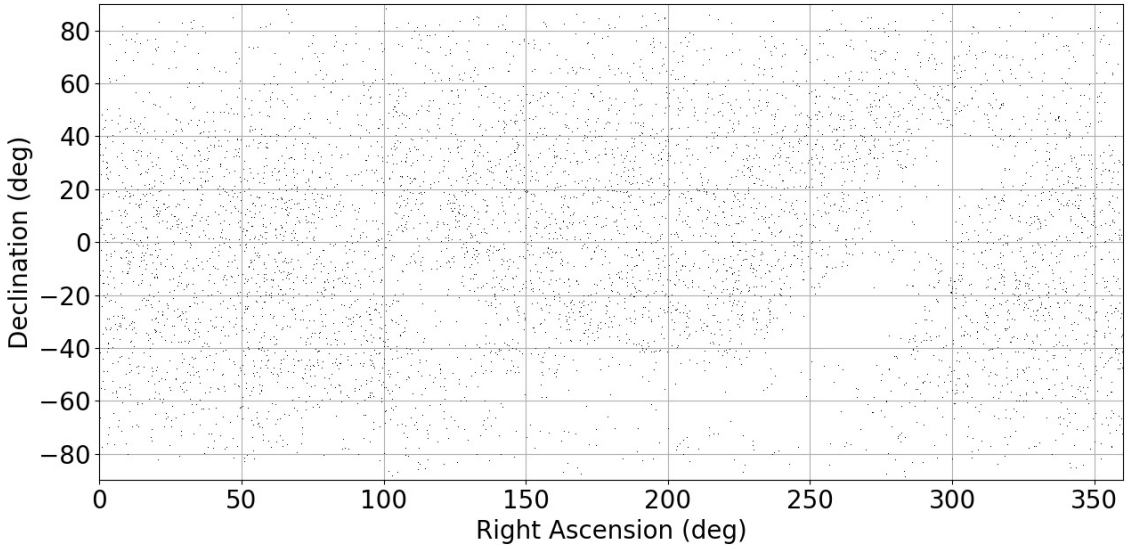

FIGURA 3.3: Gráfica del cielo completo de todos los 5 844 pares binarios de la 3.2 con mediciones de velocidad radial tanto para primarias como secundarias.

ΔV estén mínimamente afectadas por encuentros aleatorios con estrellas de campo, las cuales tendrían velocidades provenientes de una distribución gaussiana, con una dispersión de velocidades, σ, de alrededor de 40 km/s, y por lo tanto, una diferencia de velocidades también con distribución gaussiana de $\sigma = \sqrt{2} \times 40$ km/s $\approx$ 60km/s.[1]

La figura 3.4 representa el diagrama color-magnitud para esta muestra inicial, con los puntos negros siendo las 5 736 estrellas de los 2 868 pares binarios restantes, y los puntos grises siendo las 169 540 estrellas de los pares binarios no pertenecientes a grupos, pero sin mediciones de velocidad radial. En este y todos los diagramas color-magnitud subsecuentes, cada par binario contribuye con dos puntos, por construcción, del mismo tono. Queda claro que las estrellas sin mediciones de velocidades radiales son sistemáticamente más tenues que aquellas del catálogo de *Gaia eDR3* con velocidades radiales. Éstas últimas incluyen a las estrellas menos brillantes de Secuencia Principal de la vecindad solar, a las Enanas Blancas en la región inferior izquierda del diagrama, e incluso una región de estrellas de Secuencia Principal y Enanas Blancas mezcladas, no resueltas, como una nube difusa entre las poblaciones de Enanas Blancas y la Secuencia Principal.

La Secuencia Principal para las estrellas seleccionadas es evidente, e incluye en una banda angosta de binarias fotométricas justo por encima de la clara Secuencia Principal, compuesta principalmente, pero no exclusivamente, de los puntos grises. De hecho, la mayor parte de las binarias fotométricas no tienen mediciones de velocidades radiales en *Gaia*, ya que falla la solución de estrella individual, dando así un criterio de exclusión adicional para estos casos. Ya que se infieren las velocidades relativas en el plano del cielo a través de observaciones de movimientos propios sobre la duración del catálogo de *Gaia eDR3*, y no de una inferencia instantánea por efecto Doppler, no hay gran

[1]Pues se trata de la convolución de dos distribuciones gausianas, cuyo resultado es una distribución gausiana con un ancho dado por la suma cuadrática de las desviaciones estándar de las distribuciones involucradas.

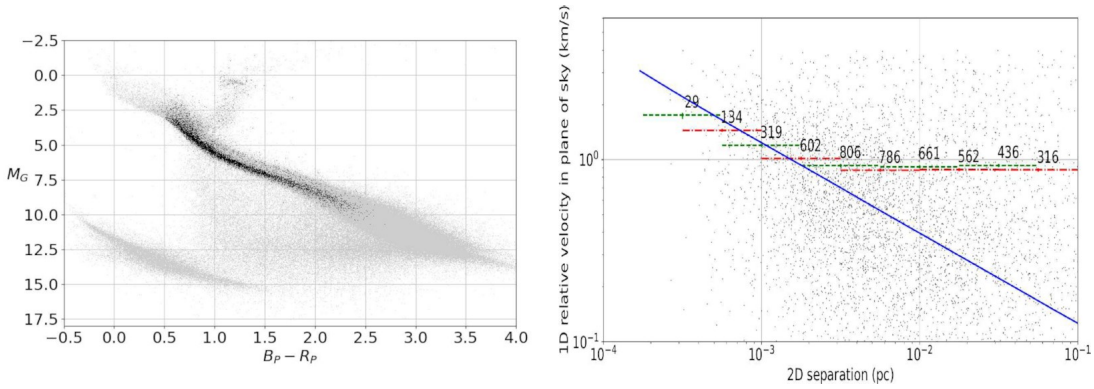

FIGURA 3.4: **Izquierda(a)**:Diagrama color-magnitud para todas las 5 736 estrellas de los 2 868 pares binarios mostrados en la figura 3.3, también con velocidades radiales relativas entre las dos componentes < 4 km/s y señal a ruido en movimientos propios para Ascención Recta y Declinación para ambas componentes > 40, como puntos negros, y los puntos grises representando las 169,540 estrellas de la figura 3.2. La exclusión de pares binarios con sólo enanas blancas, pares mezclados con enanas blancas y secuencia principal, y las estrellas de bajo brillo con alto ruido es evidente. **Derecha(b)**: Raíz cuadrática media agrupada de la distribución de velocidades relativas unidimensionales entre los miembros de los 2 474 pares binarios mostrados en el panel izquierdo de esta figura, también con velocidad radial relativa < 4 km/s y una señal a ruido en ambas cantidades > 0.3, como función de las separaciones proyectadas en dos dimensiones entre los miembros de cada par, para las distintas mediciones en A.R. y Dec. con líneas discontinuas y punteadas, respectivamente, con errores relativos promedio para ambas cantidades de 10.77 y 11.85, respectivamente. Cada par binario también aparece como un par de puntos en una separación fija, para sus correspondientes velocidades relativas en A.R. y Dec. La línea sólida representa la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine, 2010 para la misma cantidad.

sensibilidad ya sea a aceleraciones, o velocidades inducidas por terciarias ocultas, sino solamente a los desplazamientos resultantes, las cuales dentro de un grado de libertad, se promedian a lo largo de las posibles órbitas de terciarias ocultas. Estas terciarias ocultas, cuando son muy cercanas con periodos orbitales mucho menores a los $\sim$34 meses de la misión *Gaia eDR3*, podrían proporcionar altas velocidades instantáneas, pero desplazamientos muy breves, los cuales implican una contaminación cinemática despreciable a través de las determinaciones de las velocidades relativas por movimientos propios. Desde luego, para terciarias ocultas con grandes separaciones, un efecto de contaminación que infle las velocidades relativas de las binarias abiertas puede aparecer, y más adelante ser verá la estrategia seguida para minimizar la presencia de estas terciaras en la muestra final, como los datos actuales lo permiten.

Para concluir esta sección, se presenta una gráfica cinemática para la muestra inicial en la figura 3.4(b), que es una distribución de la raíz cuadrática media (RMS) de velocidades unidimensionales como función de la separación proyectada en 2D, con las líneas discontinuas para las mediciones en A.R., y las punteadas para la Dec. Una depuración adicional de binarias con valores de velocidad relativa final con señal a ruido < 0.3, o

$\Delta V > 4$km/s, ya sea en A.R. o Dec. deja al final 2474 pares binarios con valores promedio de señal a ruido en A.R y Dec. de 3 314 y 3 285, respectivamente, y un valor de señal a ruido para mediciones del paralaje de 683. Estos últimos dos cortes también serán implementados en todas las siguientes distribuciones cinemáticas. La distancia media heliocéntrica para estas estrellas es de 107 pc, y el valor promedio del parámetro RUWE es 1.34. El último límite inferior de señal a ruido en las velocidades mencionadas sólo excluye algunas anomalías muy ruidosas, los valores promedio de señal a ruido para esta muestra son de 10.77 y 11.85 para A.R y Dec., respectivamente.

Ya que la muestra considerada termina en separaciones de 0.1 pc, y dada la esfera de exclusión de radio 0.5 pc introducida en la selección de la muestra, las binarias obtenidas con las mayores separaciones están aisladas de cualquier otra fuente de *Gaia eDR3* con mediciones de paralaje de hasta 5 veces la separación binaria, para separaciones de 0.01 pc, y continúa creciendo linealmente hacia las separaciones más pequeñas consideradas.

La línea sólida corresponde a los resultados de Jiang y Tremaine, 2010 para la RMS de las velocidades relativas unidimensionales para una población simulada de 50 000 pares binarios compuestos de dos estrellas de una masa solar, y para una distribución aleatoria de proyecciones en la línea de visión con una distribución razonable de elipticidades, después de 10 Gyr de evolución en la vecindad solar bajo la influencia de encuentros al azar con estrellas de campo y las fuerzas de marea galácticas, todo asumiendo gravedad Newtoniana. Esta línea sigue muy de cerca una caída kepleriana del tipo $\Delta V_{RMS} \propto s^{-1/2}$ hasta el radio de marea del problema, cercano a 0.7 pc, que se encuentra más allá de la región explorada en este caso. De hecho, se muestra la figura hasta la separación de 0.1 pc, lo cual implica que para todas las binarias incluidas, ambas componentes son al menos cinco veces más cercanas que cualquier otra fuente de *Gaia eDR3* de la selección inicial. Las fuentes débiles con mediciones de paralaje deficientes pueden existir dentro del círculo proyectado de 0.5 pc alrededor de los componentes binarios, pero dado el corte previo a 200 pc de distancia, serán típicamente objetos de fondo.

Se puede ver en la figura 3.4(b) una cinemática consistente con la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine para las clases de menor separación, y una transición a una distribución de valores RMS de la velocidad relativa constante para la región de $s > 1.5 \times 10^{-3}$pc. Los puntos grises en esta figura y en las subsecuentes, muestran cada medición individual, y no se muestran algunos puntos individuales con velocidades muy pequeñas, dado que están muy por debajo del rango seleccionado para poder apreciar mejor los resultados, aunque sí se toman en cuenta para el cálculo de la distribución. Estos puntos no se pueden comparar directamente y de manera individual a las predicciones Newtonianas de Jiang y Tremaine, ya que ésta hace referencia a los valores RMS de la distribución de puntos, que es lo que se muestra en las clases del histograma.[2]

[2]El valor de RMS para las velocidades relativas en una muestra grande de binarias abiertas modeladas bajo la gravedad Newtoniana y con una distribución de elipticidades y proyecciones orbitales respecto a un observador, de Jiang y Tremaine, 2010, representadas con una línea sólida en la figura 3.4(b), sólo se pueden comparar con valores RMS de distribuciones de velocidades relativas para binarias abiertas, no con valores individuales de una binaria abierta en particular. Así, se reportan los puntos individuales de las binarias abiertas obtenidas para mostrar la distribución completa de valores que se obtienen, pero no para compararse directamente con la línea sólida, la cual sólo tiene sentido al compararse con las clases del historgrama de los valores de RMS obtenidos. Nótese también que el valor RMS de una distribución está sesgado hacia valores grandes con respecto a la media, de modo que si se tiene una distribución de puntos distribuidos aparentemente igual por encima y por debajo de una predicción de un valor de RMS, la distribución considerada necesariamente tendrá un valor de RMS mayor que la predicción en cuestión.

Una exploración más cuidadosa de la física detrás de estas tendencias se puede intentar explorar al considerar una estimación de la masa total de cada binaria en esta muestra inicial, y un estudio de los escalamientos de masa-velocidad presentes. Utilizando la estimación de masa utilizada en Pittordis y Sutherland, 2019:

$$\frac{M}{M_\odot} = 10^{0.0725(4.76-M_G)} \tag{3.1}$$

donde se muestra que la banda fotométrica G de *Gaia* (M_G) da una buena determinación de la masa estelar por medio de esta ecuación, para estrellas de la secuencia principal. Los ajustes a leyes de potencias para el histograma de distribuciones de ΔV promedio como función de la masa binaria para los datos mostrados en la figura 3.4(b) dan pendientes logarítmicas de 0.33 ± 0.12 y 0.32 ± 0.07 para las regiones $s < 1.5 \times 10^{-3}$ pc y $s > 1.5 \times 10^{-3}$ pc, respectivamente. La falta de un escalamiento claro de $\Delta V \propto M_b^{0.5}$ en la región de $s < 1.5 \times 10^{-3}$pc probablemente se deba a la presencia de contaminación cinemática la muestra inicial, como es evidente, por ejemplo, en la presencia de algunas binarias espectroscópicas en los puntos negros de la figura 3.4(a). Además, la consistencia de ambos escalamientos de masa-velocidad mencionados arriba sugieren un origen común para las velocidades relativas mostradas, de nuevo probablemente dominados por contaminantes cinemáticos. Una limpieza posterior de la muestra para minimizar la presencia de estas y otras fuentes de contaminación se describen a continuación.

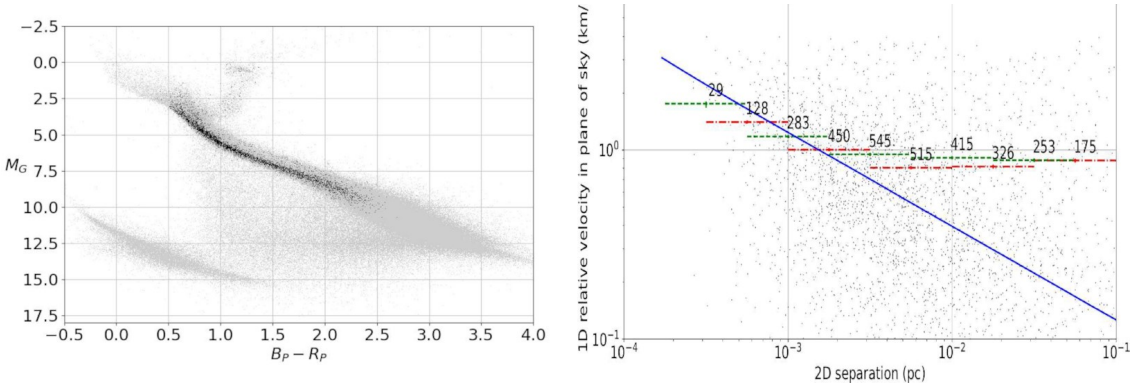

FIGURA 3.5: **Izquierda(a)**: La figura es análoga al panel izquierdo de la figura 3.4, pero sólo contiene como puntos negros las 3 700 estrellas de los 1850 pares binarios restantes tras incluir otro corte de distancia heliocéntrica menor a 130 pc, resultando en una significativa reducción en la cantidad de binarias fotométricas. **Derecha(b)**: La figura es análoga al panel derecho de la figura 3.4, pero esta vez sólo contiene 1642 pares binarios tras el corte de distancia descrito arriba. Los errores relativos promedio para las diferencias de velocidad en A.R y Dec. son de 13.17 y 15.01, respectivamente.

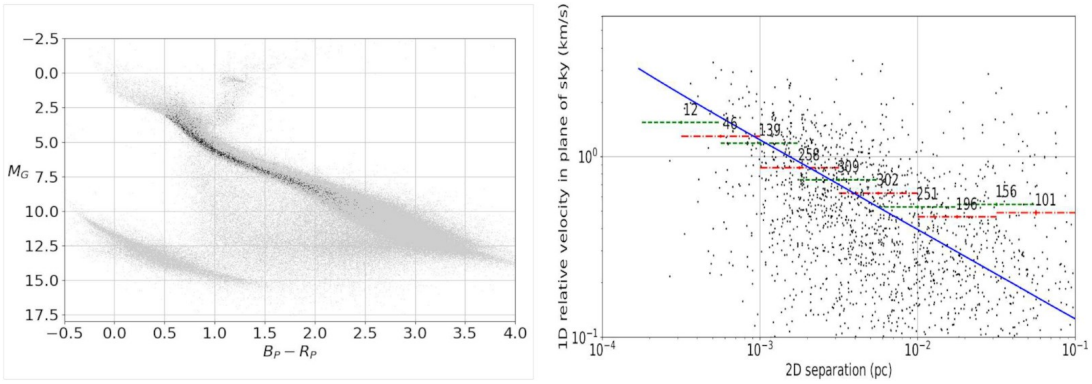

FIGURA 3.6: **Izquierda(a)**: La figura es análoga al panel izquierdo de la figura 3.4, pero sólo contiene como puntos negros 2 016 estrellas de los 1 030 pares binarios tras la inclusión de un corte para RUWE < 1.2, resultando en una casi completa exclusión de binarias fotométricas y una reducción significativa en la cantidad de estrellas post turn-off. **Derecha(b)**: La figura es análoga al panel derecho de la figura 3.4, pero esta vez sólo contiene 929 pares binarios tras el corte calidad descrito arriba. Los errores relativos promedio para las diferencias de velocidad en A.R y Dec. son de 14.39 y 15.88, respectivamente.

3.2. Remoción de las fuentes de contaminación cinemática

A continuación se describe una secuencia de tres criterios de calidad de datos y exclusión de contaminantes cinemáticos, los cuales se aplicaron secuencialmente. El primer paso en la eliminación de los contaminantes cinemáticos consiste en introducir un corte en la distancia heliocéntrica para restringir la muestra a un subconjunto menor, de alta calidad, donde la prevalencia de compañeras estelares no detectadas disminuya, pues todos los errores sistemáticos dependientes de la magnitud aparente se reducen. Por supuesto, cualquier restricción en la distancia máxima considerada implica un compromiso en términos de una caída rápida de la cantidad de binarias que permanecen. Se halla que el corte de distancia más restrictivo que todavía arroja un número de binarias manejable es de 130 pc. Esto reduce la muestra a 1850 pares binarios, que son las 3700 estrellas mostradas en el diagrama color-magnitud de la figura 3.5(a), los puntos gris claro son los mismos que se muestran en la figura 3.4(a).

La gráfica cinemática correspondiente se presenta en la figura 3.5(b), donde se observa después de excluir los pares con valores bajos de señal a ruido en la velocidad, e imponiendo una velocidad relativa máxima en el plano del cielo de 4 km/s, como se describe en el caso de la figura 3.4(b), sólo quedan 1642 pares binarios. La distancia promedio, señal a ruido promedio en A.R. y Dec., y valores de RUWE promedio de esta muestra son respectivamente, 79.6 pc, 4 091, 4 047 y 1.37. Se observa cómo la reducción en la distancia resulta en observaciones astrométricas más precisas.

Comparando los diagramas HR de la figura 3.5(a) con la figura 3.4(a), se observa que la reducción en la distancia redujo a su vez de manera significativa el número de binarias fotométricas en la muestra en la banda distintiva justo por encima de la secuencia principal, la cual también aparece definida más claramente. Disminuye también la

cantidad de estrellas más brillantes en la región de *turnoff*, conforme los números totales disminuyeron. Al comparar las figuras 3.4(b) y 3.5(b), también se puede observar que la reducción en la distancia y la correspondiente limpieza cinemática de la muestra resultan en una ligera caída en la amplitud de la señal en la región con ΔV_{RMS} constante a la derecha de la gráfica, pero sin cambios cualitativos significativos. En efecto, los escalamientos en masa-velocidad tanto para la región que se ajusta a la predicción Newtoniana de Jiang y Tremaine, 2010, como en la que se encuentra a la derecha, presentando la ligera caída en amplitud descrita anteriormente, muestran de nuevo ajustes a una ley de potencias con pendientes logarítmicas consistentes con aquellas de la figura 3.4(b), y que no corresponden con algún escalamiento físico evidente.

El siguiente corte de calidad a introducir consite en limitar directamente el número máximo de los parámetro de RUWE permitidos para las estrellas consideradas. Este parámetro da una medida de la calidad del ajuste para la solución de una estrella en *Gaia* realizado en cada una de las fuentes modeladas, y es sabido que se desplaza a valores mayores en casos donde hay estrellas compañeras no resueltas presentes, ver por ejemplo Penoyre et al., 2020. Se introduce un corte superior de RUWE < 1.2 tal que si cualquiera de los miembros del candidato a par binario no cumple con ese límite, todo el par es removido del catálogo. Al comparar con los valores promedio de los parámetros RUWE para las muestras de las figuras 3.4 y 3.5, de 1.34 y 1.37, respectivamente, se hace evidente que la introducción de este límite superior en esta etapa representa un corte bastante grande.

De hecho, los puntos negros en el diagrama HR de la figura 3.6(a) representan solamente las 2016 estrellas de los 1008 pares binarios, mostrando una región de Secuencia Principal extremadamente bien definida, con prácticamente ninguna binaria fotométrica evidente por encima. Así mismo, la región del *turnoff* se encuentra casi completamente vacía, tal como es el caso de la Secuencia Principal a la derecha del color alrededor de 2.25, donde los errores más grandes, y por lo tanto mayores probabilidades de contaminación por compañeras estelares no resueltas, se evidencian desde la distribución subyacente en gris claro.

En la figura 3.6(b) se muestra la gráfica cinemática para esta muestra, la cual contiene solamente 929 pares de binarias abiertas con ajustes de muy alta calidad de *Gaia* para ambas componentes. En efecto, el valor medio de RUWE para este caso es de solamente 0.99. Como reflejo de tener una muestra mucho más limpia que con la que comenzamos, los valores medios de señal a ruido para las observaciones de movimientos propios en A.R., Dec. y paralaje son ahora de 4 123, 4 073 y 911, respectivamente. En esta ocasión se observa un cambio más pronunciado con respecto a las figuras 3.4 (b) y 3.5(b) previas, en que la región sobre la que los resultados trazan cuidadosamente las predicciones Newtonianas de Jiang y Tremaine, 2010 ahora se extienden a separaciones más grandes, con resultados consistentes hasta llegar a casi 10^{-2}pc. Concurrentemente, la amplitud en la región de ΔV_{RMS} constante ha disminuido nuevamente y ahora aparece alrededor de los 0.5 km/s. Aunque los números totales han disminuido considerablemente respecto a las 2 474 binarias de la figura 3.4(b), debido a la eliminación de candidatos binarios donde las probabilidades de contaminación eran mucho mayores que en los que quedan, el rango dinámico muy reducido en las masas totales, de tan solo un factor de 2.2, todavía no permite una detección clara de cualquier tendencia físicamente significativa en los escalamientos de velocidades contra masa, en ninguna de las regiones de este diagrama.

Después, la depuración final del catálogo consistió en seleccionar directamente sobre el diagrama HR las regiones que contuvieran una presencia mínima de compañeras estelares no resueltas, después de haber hecho todos los cortes descritos previamente. Penoyre et al., 2020 presentan un análisis extremadamente detallado de binariedad, variabilidad, y contaminación cinemática en velocidades relativas de binarias abiertas como función del parámetro RUWE, y localización en el diagrama H-R del catálogo de *Gaia*. Utilizando estos resultados, se define una región estrecha de la secuencia principal superior como el criterio final de inclusión. La región seleccionada morfológicamente a través de rangos de M_G y $B_p - R_p$, adicionalmente a nuestro filtro previo de RUWE, limita la presencia de cualquier contaminación cinemática a través de compañeras estelares no resueltas a menos del 5 %, de acuerdo con Penoyre et al., 2020 (ver su figura 10 derecha) para los rangos de magnitud utilizados aquí. Incluso la presencia de Júpiteres calientes, o también externos, disminuye rápidamente para estrellas con valores de RUWE por debajo de 1.0. Tal como con los cortes previos, todos los candidatos a pares binarias para los cuales alguno de sus miembros se sale del corte en color-magnitud, es removido.

La región de inclusión discutida se muestra en la figura 3.7(a), y comprende sólo una sección muy bien definida de la Secuencia Principal superior. Esta región está definida por todas las estrellas dentro de un intervalo de ± 0.4 en magnitud vertical de la línea que une los puntos (0.7,4.7) y (2.0,8.7), donde las coordenadas representan magnitud y color, respectivamente. Esta selección final deja solamente 444 pares binarios, los cuales tras los criterios de señal a ruido cinemático, y velocidades relativas inferiores a 4 km/s, resultan en los 423 pares binarios mostrados en la figura 3.7(b). Para esta muestra final de alta calidad, los valores promedio de señal a ruido para los parámetros de *Gaia* utilizados son ahora de 4202, 4064 y 950 para movimientos propios en A.R y Dec., y paralaje, respectivamente. Los valores promedio de la señal a ruido de las velocidades relativas finales para esta muestra son cerca del 50 % más altos que aquellos de la muestra inicial de la figura 3.4, 14.88 y 18.62 para A.R y Dec., respectivamente.

Esta gráfica cinemática final es en gran medida consistente con la anterior de la figura 3.6(b), con la amplitud de la región que no muestra dependencia de los valores de ΔV_{RMS} con la separación todavía en 0.5 km/s. También es evidente la aparición de fluctuaciones aleatorias, indicativas de la relevancia del ruido poissoniano conforme disminuye el número de pares binarios a considerar. La región de consistencia con las predicciones Newtonianas ahora se extende hasta alrededor de 10^{-2}pc.

Finalmente, en la figura 3.8(a) se presenta el escalamiento de masa-velocidad para los 295 pares binarios con separaciones por debajo de los 0.009pc en la figura 3.7(b), y los 128 pares con separaciones mayores a 0.009pc también de la figura 3.7(b), en la figura 3.8(b). Es interesante que, a pesar del rango dinámico tan restringido por la física estelar intrínseca y los números tan bajos que permanecen después de la serie de cortes tan estrictos aplicados, en la figura 3.8(a) aparezca un escalamiento en las diferencias de velocidades unidimensionales promedio para las binarias seleccionadas como $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.52\pm0.14}$ (con coeficiente de correlación de 0.88, que es mucho mayor que cualquier otro escalamiento de masa-velocidad obtenido previamente aquí), perfectamente consistente con las expectativas Newtonianas, las cuales se ven claramente satisfechas en el escalamiento de la figura 3.7(b) de $\Delta V_{RMS} \propto s^{-1/2}$ en esa región. Este último resultado da validez del procedimiento utilizado para identificar sólo pares de binarias abiertas de la vecindad solar aisladas con calidad y pureza extremadamente altas, a

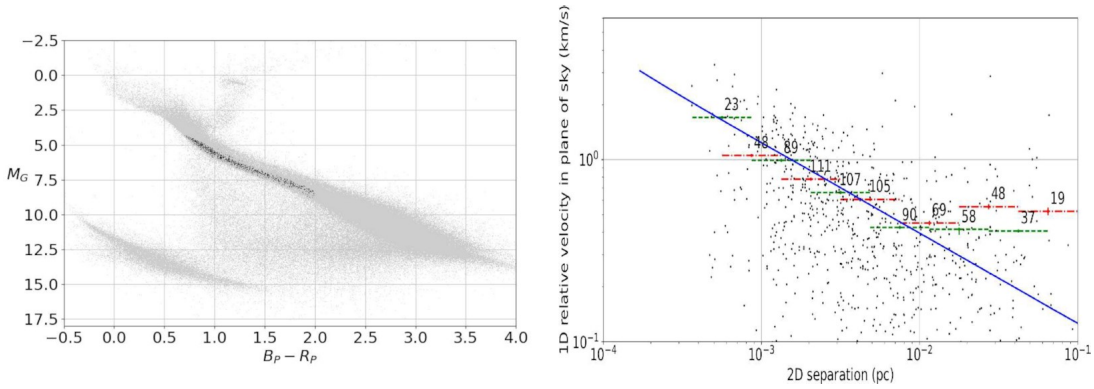

FIGURA 3.7: **Izquierda(a)**: La figura es análoga a la Fig. 3.6(a), pero solamente contiene como puntos negros 888 estrellas de los 444 pares binarios tras la inclusión de una selección estricta de color-magnitud, como se muestra en esta figura, restringiendo la muestra a la región más limpia identificada por Penoyre et al., 2020 en términos de una ausencia casi completa de contaminación cinemática. Cualquier par binario donde cualquiera de sus componentes se sale de la región seleccionada es removido. **Derecha(b)**: La figura es análoga a la Fig. 3.6(b), pero esta vez contiene solamente 423 pares binarios, tras el corte de calidad descrito. Los errores relativos promedio para las diferencias de velocidades en ascención recta y declinación son de 14.88 y 18.62, respectivamente.

costa de sólo poder incluir un pequeño número de dichos pares estelares.

En esta última gráfica, la masa promedio de pares binarios es de $1.6M_\odot$ para ambos paneles. Para el panel (b) de dicha figura, el escalamiento de la diferencia de velocidades unidimensionales respecto a la masa total es $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$, con un coeficiente de correlación de 0.63. Igual que con la gráfica previa, hemos dividido el rango total de masa en tantas clases como fue posible, con la restricción de que contuvieran por lo menos 10 pares cada una.

Se debe tener cuidado con que los intervalos de confianza para los escalamientos de masa velocidad en todos los casos son límites inferiores a estas cantidades, ya que sólo son intervalos estadísticos formales, que ignoran toda una serie de errores aleatorios y sistemáticos todavía presentes. Uno de ellos es la varianza inherente a la estimación de las masas estelares de la ecuación 3.1, la cual es difícil de calcular correctamente. De manera similar, la estimación de color-magnitud a través de comparaciones con isocronas de El-Badry y Rix, 2018, se proporciona un intervalo de confianza de $\pm 0.1M_\odot$ para sus estimaciones de masa fotométricas, las cuales coinciden cercanamente con las de la ecuación 3.1 para el rango de Secuencia Principal utilizado.

Además, dado el pequeño número de pares binarios disponibles en la figura 3.8(b), el débil escalamiento de la masa con la velocidad presente, y el estrecho rango dinámico M_b accesible, la pendiente obtenida es suceptible a unas 1.5 veces el intervalo de confianza obtenido, dados los detalles de los varios cortes cinéticos y de calidad y procedimientos de limpieza aplicados. Aún así, hay una clara indicación de una pendiente menor para el escalamiento de la velocidad con la masa en la región $s > 0.009$pc, en comparación con aquél encontrado para $s < 0.009$pc, lo cual es de hecho consistente con el escalamiento galáctico de Tully- Fisher, $V_{TF} = 0.35(M/M_\odot)^{1/4}$ km/s para $a < a_0$.

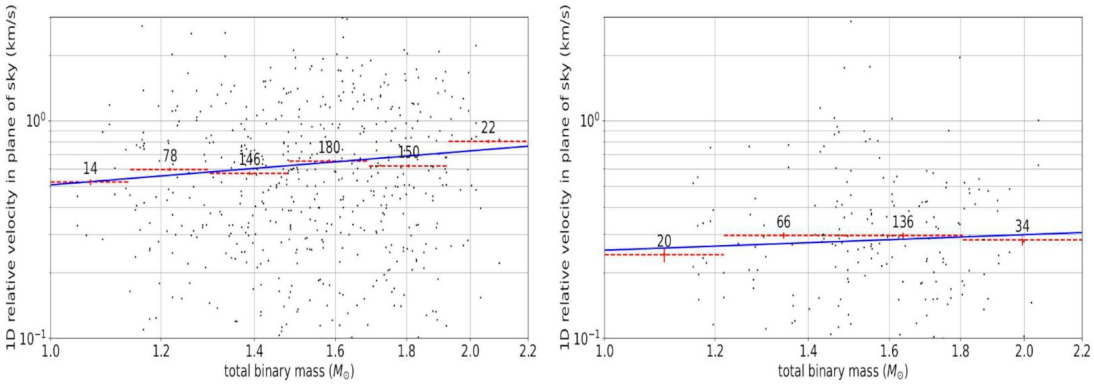

FIGURA 3.8: **Izquierda(a)**: Este panel muestra el promedio por clases de velocidades relativas en 1D contra escalamientos de masas binarias para los pares con separaciones < 0.009pc en la Fig.3.7(b), donde cada binaria contribuye con dos puntos, uno para A.R. y otra para Dec. Los errores promedio relativos para las diferencias de velocidades en A.R. y Dec. son de 18.36 y 23.56, respectivamente. Una ajuste de ley de potencias para este escalamiento da $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.52\pm0.14}$ **Derecha(b)**: Este panel es análogo al del lado izquierdo, pero para separaciones > 0.009pc. Los errores relativos promedio para las las diferencias de velocidades en A.R. y Dec. son de 6.85 y 7.24, respectivamente. El ajuste de ley de potencias para este escalamiento en este caso da $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$

En resumen, las terciarias ocultas junto con compañeras brillantes son efectivamente binarias fotométricas, las cuales están eficientemente excluidas a través de la selección del diagrama H-R, así como a través de la falta de soluciones de estrellas individuales fotométricas y espectroscópicas precisas, las cuales se hacen evidentes por los valores altos del parámetro RUWE, y la falta de velocidades radiales reportadas, respectivamente. Las terciarias ocultas con compañeras de bajo brillo y separaciones de menos de 10 UA inducen un tambaleo en el miembro detectado de la candidata a binaria abierta, lo cual resulta en ajustes a soluciones de estrella individual en *Gaia* muy pobres, y que posteriormente se descartan por tener valores altos en el parámetro RUWE. En este punto, Penoyre et al., 2020 estiman menos del 5 % de contaminación por terciarias ocultas para separaciones internas por debajo de las 10 UA, en la región HR de interés, para un límite superior del parámetro RUWE de 1.4, en estrellas dentro de 1kpc de nuestro Sol. Estos números se pueden comparar con el corte superior de RUWE mucho más estricto de 1.2 (y con promedio de valores finales de 0.99), y el límite de distancia de 130 pc que se utilizó en la muestra final de este trabajo. Las terciarias ocultas con separaciones internas de entre 10 y 100 UA serán difíciles de excluir, aunque su incidencia disminuye conforme se reduce el límite de distancia helicéntrica de la muestra. Inclusive asumiendo que todos estos casos aparezcan en nuestra muestra, dadas las estimaciones empíricas de sistemas terciarios (por ejemplo, una fracción total del 40 % de Tokovinin y Smekhov, 2002, Tokovinin, Hartung y Hayward, 2010), se puede esperar una contaminación menor al 15 % en la muestra final, para intervalos de separación logaritmicos uniformemente poblados (ver por ejemplo, Clarke, 2020). Estos sistemas resultarían en velocidades artificialmente aumentadas de $\lesssim$ 1km/s en la pequeña fracción de binarias afectadas. Finalmente, los encuentros no ligados están restringidos por

medio del uso de velocidades radiales relativas < 4km/s, velocidades en el plano del cielo relativas < 4km/s, y el cuidadoso procedimiento de desagrupamiento que asegura que sólo binarias aisladas permanezcan en nuestra muestra final. Dada la distancia promedio interestelar de 1 pc en la vecindad solar, y la dispersión de velocidades entre pares de alrededor de 60 km/s para estas estrellas, la presencia de encuentros no ligados en nuestra muestra final de binarias abiertas con separaciones menores a 0.1 pc es extremadamente improbable.

Durante este proyecto, se utilizó `Binary`, un script en Python que permite descargar datos estelares de *Gaia*, filtrar y procesar por medio de módulos de color-magnitud, velocidad y masa para producir las gráficas y estadística aquí presentadas, permitiendo exportar los mismos datos para ser utilizados en otros censos relacionados (DSS, 2MASS, AllWISE, GALEX, Fermi, IRIS, entre otros).

3.3. Comparación con resultados previos

A continuación se presenta una comparación de nuestros resultados con una serie de estudios similares, con especial atención en el grado con el que son consistentes o no con los hallazgos del presente trabajo, y las diferencias entre los criterios de selección, la calidad de datos disponibles, y las suposiciones hechas en la interpretación de los resultados obtenidos.

3.3.1. Hernandez et al., 2019

En Hernandez et al., 2019, los datos fueron mucho más escasos, ya que los autores comenzaron con una selección de binarias abiertas provenientes de *Hipparcos* por Shaya y Olling, 2011, dejando solamente 81 binarias en la muestra final (en parte debido a la falta de 1/3 de las fuentes de *Hipparcos* en Gaia DR2), con separaciones proyectadas entre 0.003 y 10 pc, permitiendo la presencia de solamente dos bines por debajo de 0.1 pc. Entonces, teniendo un bin cerca de 0.04 pc que muestra una clara desviación con respecto de las expectativas Newtonianas, y uno ligeramente por debajo de 0.01 donde las grandes barras de error producen ambigüedad en términos de la compatibilidad o no con la predicción Newtoniana, hizo que se identificara la región entre 0.001 y 0.1 pc como crucial para el análisis detallado. La figura 5 en Hernandez et al., 2019 no permite una identificación más allá de un orden de magnitud del umbral a partir del cual las desviaciones de la predicción Newtoniana aparecen, dados los pocos bines y las grandes barras de error resultantes de los pequeños números de binarias disponibles en el estudio.

Además, las binarias a grandes separaciones en ese estudio se vuelven sospechosas, en términos de las perturbaciones externas, dado que la separación interestelar promedio en la vecindad solar es de 1 pc, por lo tanto la posibilidad de contaminación cinemática sustancial debido a las interacciones con estrellas vecinas se hace importante a partir de algunas décimas de pársec. Extender el rango de separación de las binarias exploradas hasta 1 pc y más es problemático no sólo en términos de excluir perturbaciones cinemáticas externas, sino que también la identificación de binarias se vuelve ambigua, dada la separación típica de 1 pc de la distribución estelar promedio.

Por todo eso, se decidió concentrarse en una muestra extremadamente limpia de binarias aisladas, donde se pudiera definir una esfera de exclusión muchas veces mayor

que la separación binaria, como se detalló en la sección de selección de la muestra, y con una resolución significativa en el intervalo de separación de entre 0.001 y 0.1 pc. Esto permitió un trazado claro de la región Newtoniana, la cual sirve como control de todo el procedimiento en tanto que se recupera una concordancia precisa con las predicciones de Jiang y Tremaine, 2010, y una identificación más precisa de cualquier divergencia ocurriendo dentro de un régimen altamente libre de contaminación, debido a la distribución promedio de estrellas de campo.

Dada la escasez de bines y las barras de error mucho mayores en Hernandez et al., 2019, nuestros resultados actuales son consistentes con aquellos hallazgos previos, dentro de los intervalos de confianza signficativamente extendidos en el estudio previo.

3.3.2. Clarke, 2020

El trabajo reciente y altamente relevante de Clarke, 2020 muestra que la presencia de terciarias mezcladas, casos en donde una o ambas de las componentes de una binaria observada son en realidad un sistema binario cerrado a pequeña escala, con una de las componentes binarias no resueltas, resultará en una contaminación cinemática que infle las velocidades relativas inferidas de la binaria abierta observada a gran escala. Este estudio muestra que una distribución razonable de separaciones y masas de componentes terciarias no resueltas, a una fracción de 0.5, puede ser utilizada para dar cuenta de los resultados de Hernandez et al., 2019. Resulta interesante que dicha distribución de terciarias no detectadas debería ser aparente a través de varios efectos.

Sin embargo, los resultados de Clarke, 2020 dependen de manera muy crítica de los detalles de las funciones de distribución asumidas. En ese estudio, la distribución de separaciones de las terciarias ocultas se asume como uniforme en la separación logarítmica entre 3 y 100 UA. Esto significa que una fracción de 0.343 de las terciarias ocultas en dicho estudio yacen en el intervalo de 3-10 UA. Este primer intervalo de separación interno es el que produce el mayor efecto en las inferencias de las velocidades relativas de las binarias abiertas, en el contexto de Clarke, 2020, ya que las más cercanas de las terciarias ocultas son las que tienen los mayores efectos de contaminación cinemática a gran escala en la binaria abierta, debido al escalamiento Newtoniano de velocidades con la separación como $r^{-1/2}$, y dado que se asume que todos los intervalos logarítmicos de separación están igual de poblados. Como señala Clarke, muchas de las terciarias ocultas asumidas en ese estudio implican anomalías en su localización en el diagrama HR, así como soluciones astrométricas de calidad disminuida, todo lo cual permite remover de su consideración a dichas binarias afectadas. Es debido a este efecto de binarias mezcladas que pudieran cambiar el resultado, que se pasó por todo el proceso de limpieza, guiados por los resultados de Clarke, 2020 y los criterios de Penoyre et al., 2020.

En esta última referencia, a través de simulaciones cuidadosas y extensivas dentro de los parámetros de *Gaia DR2*, se concluye que las terciarias ocultas con separaciones por debajo de las 10 UA se pueden excluir principalmente a través de límites en el parámetro RUWE, y también en combinación con tomar muestras cercanas con soluciones astrométricas de alta calidad, es decir, valores altos de señal a ruido en paralaje y movimientos propios. La conclusión es que con una cota de RUWE de 1.4 y cortes altos de señal a ruido para muestras cercanas, junto con un criterio de selección de H-R como el que se aplicó, se pueden excluir terciarias ocultas por debajo de un nivel de contaminación del 5 %, como se muestra en el renglón superior de la figura 9 de Penoyre et al., 2020

para la fracción de terciaras ocultas de las estrellas de secuencia principal en el rango de magnitud que fue seleccionado.

3.3.3. Pittordis y Sutherland, 2019

Utilizando *Gaia DR2*, Pittordis y Sutherland examinan la distrubución de velocidades relativas entre las componentes de binarias abiertas, para cuatro intervalos de separación binarios entre 0.025 y 0.1 pc. Así, ellos muestrean la región donde se encuentra una clara señal por encima de las expectativas Newtonianas. Justo igual que en el presente estudio, estos autores encuentran una señal clara para velocidades relativas por encima de las expectativas Newtonianas, en una distribución extendida de velocidades relativas para todas las clases de separación muestreadas, y mencionan que probablemente correspondan a la señal no Newtoniana encontrada en este trabajo Hernandez et al., 2019, y que corresponde a la señal cinemática modelada por Clarke como debida a la presencia de terciarias ocultas. Sin embargo, estos autores modelan la distribución completa de velocidades relativas obtenidas como la suma de expectativas Newtonianas y una distribución adicional, compuesta de todo aquello que no conforma la expectativa Newtoniana, las cuales asignan a estrellas pasajeras, es decir, pares transitorios no ligados, que llegan a presentar separaciones proyectadas dentro del rango de muestra, sin tener alguna asociación física real entre ellos. Dado que no calculan el escalamiento de la masa con la velocidad dentro de esta cola extendida, es difícil determinar la consistencia de aquellos resultados con los de este trabajo en un sentido más físico, así como en términos de la presencia de una extensión de alta velocidad relativa no Newtoniana.

Como bien lo reconocen Pittordis y Sutherland, una vez que el componente Newtoniano ha sido removido de la cola de altas velocidades relativas no Newtonianas, la interpretación de estrellas pasajeras es de hecho inconsistente con el comportamiento esperado de cualquiera de dichas estrellas pasajeras. Incluso en sus simulaciones (como es de esperarse bajo cualquier modelado razonable de una población de estrellas pasajeras), la fracción de sistemas pasajeros se incrementa conforme el rango de la separación binaria aumenta, debido al aumento en la sección eficaz de la estrella pasajera. Los ajustes a la fracción de estrellas pasajeras una vez que la contribución puramente Newtoniana se substrae de sus observaciones, requiere siempre de fracciones de estrellas pasajeras cada vez menores conforme la separación aumenta. No solamente es el comportamiento de la fracción de estrellas pasajeras lo que es inconsistente, sino también la distribución de velocidades. Como se explicó previamente, si las velocidades relativas se toman aleatoriamente desde una distribución gaussiana de velocidades de campo, con una dispersión de velocidades alrededor de $\sigma = 40\mathrm{km/s}$, la velocidad relativa de pares también tendrá una distribución gaussiana, con una dispersión de velocidades $\sqrt{2}$ veces mayor, y por lo tanto, para las velocidades relativas de $\approx 1\mathrm{km/s}$ observadas para las binarias abiertas en cuestión, la distribución de estrellas pasajeras sería prácticamente constante, y no una distribución tan detallada con un pico en los valores Newtonianos, y una caída suave después, como los autores requieren una vez que los datos se dividen entre un conjunto acorde a las expectativas Newtonianas, y todo lo demás como residuo. Además, dadas las separaciones interestelares típicas de 1 pc, las fracciones de estrellas pasajeras del orden de 0.5 a separaciones de centésimas de pársec, como requieren estos autores, parecen poco probables.

Por lo tanto, no hay inconsistencia evidente alguna entre nuestros resultados y aquellos de Pittordis y Sutherland, sino más bien una clara y distinta interpretación de los resultados. Meramente estamos presentando datos empíricos que se asemejan a la dínamica de Tully-Fisher en el mismo rango general de aceleración, tan relevante para el caso galáctico (tanto en escalamientos de separación contra velocidad y masa contra velocidad), sin proponer alguna interpretación detallada. Adicionalmente, en este trabajo se están utilizando datos de *Gaia eDR3*, donde los errores típicos de movimientos propios han disminuido en un factor de 2 con respecto a los datos de *Gaia DR2*, utilizados por Pittordis y Sutherland, 2019. Por lo tanto, es enteramente posible que cierto número de sistemas que se pudieran acomodar dentro de una distribución Newtoniana dentro de los errores, tendrían ahora que ser asignados a la peculiar cola de estrellas pasajeras de alta velocidad.

Capítulo 4

Conclusiones

En la primera parte de este trabajo, se presenta una muestra de 81 binarias abiertas las cuales han sido seleccionadas con mucho cuidado para evitar asociaciones aleatorias o efectos de proyección a través de la correlación cruzada de los catálogos de *Hipparcos*, Tycho-2 y el catálogo de estrellas dobles de *Tycho*, entre otros, con la estructura detallada del espacio-fase de 5 dimensiones de la Vecindad Solar, por Shaya y Olling. Aprovechando el catálogo de identificación cruzada entre *Hipparcos* y los datos de Gaia DR2, fue posible actualizar las observaciones de movimientos propios y paralajes de Shaya y Olling, para utilizar sólamente datos astrométricos de Gaia DR2.

Estas binarias se compararon con las predicciones Newtonianas para la Raíz Cuadrática Media de las diferencias de velocidades unidimensionales relativas entre las componentes de cada binaria y sus separaciones proyectadas, incluyendo el modelado de los efectos de orientación, un número de distribuciones de elipticidades plausibles y, de manera crucial, los efectos de las mareas Galácticas y las perturbaciones de origen estelar sobre un periodo de 10 Gyr, por Jiang y Tremaine.

Para separaciones por debajo de las 7000 UA, donde las aceleraciones esperadas están por encima del límite MoNDiano de $a_0 = 1.2 \times 10^{-10}$ m s^{-2}, se encontró que los datos fueron consistentes con las predicciones Newtonianas. En cambio, más allá de las separaciones de 7000 UA, los datos son inconsistentes con las predicciones Newtonianas. Esto desafía la validez de la dinámica Newtoniana en el régimen de bajas aceleraciones, y muestra la existencia de anomalías gravitacionales del tipo usualmente atribuído de manera más general a la presencia de una componente hipotética y dominante de materia oscura, en este caso hasta la relativamente pequeña escala estelar de sub-parsecs.

Mientras que es imposible asegurarse que no haya componentes cinemáticos contaminantes en la muestra final, el proceso de depuración tan severo aplicado, orientado a la obtención de una muestra de la mayor calidad posible, a pesar de ser pequeña, junto con la convergencia de los resultados obtenidos en las figuras 3.6(b) y 3.7(b) sugiere fuertemente un origen intrínseco de la señal de velocidad asintóticamente plana, obtenida para grandes separaciones en nuestra muestra final. El estudio de la cinemática interna para binarias de $s > 7000$UA es todavía un campo muy reciente, donde estudios significativos tanto observacionales como teóricos faltan por llegar. En un intento de reconciliar estos datos todavía incompletos ya sea con las expectativas Newtonianas o MoNDianas, se hallan ambos paradigmas con problemas, como se discute a continuación.

Dentro de un marco Newtoniano, este resultado es problemático por muchas razones. En primer lugar, se esperaría ver una población substancial de binarias abiertas con

separaciones mayores a 10^{-2}pc con cinemática consistente con las expectativas Newtonianas, muy por debajo de la señal que detectamos. Esta señal no muestra dependencia con la separación y tiene una raíz cuadrática media consistente con 0.5km/s entre 10^{-2} y 10^{-1}pc. Las binarias abiertas dentro de dicho rango de separación, muy por debajo del radio de marea Newtoniano de $\approx$ 0.7pc, y con cinemática consistente con expectativas Newtonianas, sólo aparecen en números muy reducidos dentro de esta muestra de *Gaia eDR3*.

En segundo lugar, es difícil explicar la presencia de una población claramente definida de binarias abiertas en el rango de separación mencionado, con velocidades relativas en el plano del cielo con valores de RMS consistentes con 0.5km/s. Si estas binarias fueran intrusas no ligadas, el tiempo de vida de dichos sistemas para el punto medio del rango de separación mencionado de 5×10^{-2}pc es de unos cuantos $\frac{5\times10^{-2}}{0.5} \times 10^6 \approx 10^5$ años. Así, dado que los tiempos de vida promedio de las estrellas involucradas es cercano a los 10 Gyr, las binarias abiertas que definen a la señal de 0.5 km/s tendrían que interpretarse como transientes que duran solamente 10^{-5} veces el tiempo de vida de las estrellas involucradas.

A pesar de la estrategia concienzuda de remoción de contaminación cinemática utilizada, podría esperarse la presencia de una fracción remanente de terciarias ocultas de hasta un 40 % dentro del intervalo de separación entre 13.4 y 100 UA (que resulta en cerca de una de cada siete de las binarias finales, asumiendo la distribución de terciarias ocultas constante por intervalos logarítmicos usada por Clarke, 2020), como muestran estimaciones empíricas de Tokovinin y Smekhov, 2002 y Tokovinin, Hartung y Hayward, 2010. Por ejemplo, una terciaria oculta de $0.3M_\odot$ orbitando a 100 UA de un miembro de una binaria abierta Newtoniana, compuesta por dos estrellas de masa solar, modificaría la velocidad relativa de la binaria en cuestión, desde 0.2 km/s en ausencia de la terciaria oculta, hasta 1 km/s, dependiendo de las orientaciones relativas de ambas órbitas y elipticidades. Sin embargo, parece poco probable que cualquier contaminante cinemático remanente, ya sean terciarias escondidas o estrellas pasajeras, debieran constituir una fuente de efectos de contaminación dominante, por la razón que viene a continuación.

Si la contaminación por terciarias ocultas fuera un factor dominante en la región de separación no Newtoniana de nuestra gráfica final, a partir de 0.009 en la figura 3.7(b), y dada la ausencia empírica de una correlación entre la fracción de terciarias y la separación de binarias abiertas (ver v.g. Tokovinin, Hartung y Hayward, 2010), tal tipo de contaminación estaría presente de igual manera a través de la región Newtoniana. Hacia las separaciones menores, sería claramente de una menor amplitud relativa, pero sería igualmente dominante cinemáticamente justo a la izquierda de la transición entre ambos regímenes. Se confirmó que el escalamiento Newtoniano que se reporta en la figura 3.8(a) para la región Newtoniana de la figura 3.7(b) no se pierde al ir a separaciones mayores dentro de esta región. De hecho, para el rango de separaciones entre 0.003 y 0.009 pc de la figura 3.7(a), se obtiene un escalamiento de masa-velocidad $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.56\pm0.28}$ con un coeficiente de correlación de 0.71. La incertidumbre en la pendiente es ahora algo mayor a lo que se obtiene para el rango mucho más poblado de 0.0004 a 0.009 en la figura 3.7(b) con $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$, pero crucialmente se mantiene dentro de la expectativa Newtoniana de 0.5, dentro de los intervalos de confianza.

Si los contaminantes cinemáticos fuesen dominantes para separaciones por encima de los 0.009 pc, serían igual de dominantes para valores por encima de este límite, y

entonces esperaríamos un escalamiento constante de masa-velocidad a lo largo de toda la transición. Esto no es lo que ocurre, ya que a partir de los 0.009 pc, el escalamiento de masa-velocidad se desplaza a un $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$ mucho menor. El uso de los escalamientos de masa-velocidad en las distintas regiones de las gráficas presentadas, aporta un diagnóstico físico independiente a las causas probables de las tendencias observadas en las gráficas de velocidad-separación. El claro escalamiento Newtoniano de masa-velocidad obtenido tanto para el rango de separación completo, mostrando un escalamiento de velocidad-separación Newtoniano en la figura 3.7(b) y la pequeña región de 0.003 a 0.009 pc inmediatamente antes de la divergencia de las expectativas Newtonianas, es un indicador del hecho de que cualquier nivel remanente de contaminación cinemática no es dominante a lo largo de las regiones tanto Newtoniana como no Newtoniana.

Por otro lado, si hay estrellas transitorias, también son inconsistentes con el hecho de ser encuentros casuales de pare de estrellas provenientes de la distribución promedio de velocidades de la Vía Láctea en la vecindad solar. Como se mencionó anteriormente, la distribución de velocidades relativas de pares es una gaussiana con una dispersión de velocidades cercana a los 60 km/s. Dado el corte cinemático superior de 4 km/s introducido, mucho menor que la dispersión de velocidades relativas por parejas para estrellas provenientes de la distribución total de la vecindad solar, se esperaría una distribución prácticamente constante de velocidades relativas para las binarias bajo estudio, distribuidas uniformemente entre 0 y 4 km/s. Dicha distribución de velocidades relativas tendría una raíz cuadrática media ligeramente por encima de 2 km/s, mucho más alta que los 0.5 km/s que obtuvimos, que es inconsistente con este valor por muchas veces el error estadístico de los datos de alta calidad del catálogo *Gaia eDR3*.

Así, si fuesen estrellas al azar de la vecindad solar que solamente resultan estar dentro de una distancia de 5×10^{-2}pc de cada una, necesariamente mostraría velocidades relativas mucho más altas que aquellas que se encuentran. Además, la separación interestelar promedio en la vecindad solar es de cerca de 1 pc, lo que hace que estrellas con separaciones típicas de entre 10^{-2} y 10^{-1}pc, con velocidades relativas de 0.5 km/s, sean inconsistentes tanto con ser binarias ligadas Newtonianas, como con ser encuentros casuales dentro de la vecindad solar.

Si los resultados obtenidos son debidos a una población de binarias abiertas ligadas que muestran una cinemática inconsistente con la dinámica Newtoniana, algunas estimaciones a primer orden resultan ilustrativas. Primero, es interesante notar que la separación crítica a partir de la cual la cinemática observada deja de seguir las predicciones Newtonianas de Jiang y Tremaine, 2010, está solamente un poco por debajo, considerando la precisión permitida por el tamaño de clase impuesto por el número de binarias en la gráfica final, de un valor de 0.035 pc. Este es el umbral originalmente identificado en Hernandez y Jiménez, 2012 como el límite de separación a partir del cual un sistema binario compuesto de estrellas de $1M_\odot$ se encontrará en el régimen de bajas aceleraciones $a < a_0$, donde aparecen las anomalías gravitacionales, usualmente identificadas como señales de la presencia de halos de materia oscura en el contexto de dinámica galáctica (v.g. Milgrom, 1984 o Lelli, McGaugh y Schombert, 2017).

Además, la transición que surge en el umbral mencionado anteriormente, es reminiscente de la transición entre un régimen dominado por materia bariónica en galaxias, y la subsecuente región de curva plana de rotación $a < a_0$, debido a que lo que se

encuentra es justamente un régimen bariónico consistentemente Newtoniano, de separaciones pequeñas, que transita a una región de valores RMS de velocidades relativas constantes que, bajo el escenario Newtoniano, implica la presencia de un halo singular isotérmico de materia oscura. En las escalas de separación y velocidad muestreadas por las binarias estudiadas, tales halos de materia oscura serían inconsistentes no sólo con los escenarios de formación de estructuras estándar, sino también con la cantidad total de masa de la Vía Láctea, v.g. Kuijken y Gilmore, 1991.

Por último, parecería una coincidencia muy improbable que, en la ausencia de una conexión causal, al extrapolar la relación Tully-Fisher bariónica entre la masa total bariónica de una galaxia y la amplitud de su curva de rotación $V_{TF} = 0.35(M/M_{\odot})^{1/4}$ hasta escalas de masas estelares, v.g. con un promedio de $1.6M_{\odot}$ de nuestros sistemas binarios, como se infiere de las estrellas de Secuencia Principal examinadas en la figura 3.7(b), que se debería obtener para la amplitud de la correspondiente curva de rotación plana, un valor de 0.4 km/s. Este último valor es bastante cercano a la raíz cuadrática media de la velocidad en el plano del cielo que se obtiene en la región de "rotación plana" con separación de ≈ 0.5km/s.

Dentro de un escenario puramente Newtoniano, la posibilidad de que haya una terciaria oculta con luminosidad muy baja, o compañeras de jerarquías superiores no se puede descartar, pues la presencia de enanas blancas extremadamente frías, o inclusive agujeros negros con periodos más largos que la línea base temporal de *Gaia* no producirían una alteración significativa (Penoyre et al., 2020) del tipo de presencia que se puede inferir a partir de una disminución de la calidad del ajuste que se hace patente con un índice RUWE cada vez mayor. Este tipo de materia oscura sería por supuesto una solución *ad hoc* que tendría que introducirse casualmente al cruzar el límite $a < a_0$, y justo con la amplitud adecuada para que esencialmente coincidiera con la extrapolación Tully-Fisher mencionada anteriormente.

Por otro lado, estos resultados no pueden ser reconciliados tampoco con MoND de manera inmediata. Esto es debido a que en las versiones más estudiadas de MoND se espera que aparezca un Efecto de Campo Externo, tal que si un sistema se encuentra internamente en el régimen de bajas aceleraciones, pero es parte de otro con $a \gtrsim a_0$, como por ejemplo las binarias abiertas como parte de la vecindad solar de la Vía Láctea. En ese caso, se espera que las modificaciones con respecto a las predicciones Newtonianas sean muy pequeñas, del orden de un 20 %, v.g. Pittordis y Sutherland, 2019. Aunque MoND es fundamentalmente una construcción empírica, el Efecto de Campo Externo permanece primordialmente como una predicción, salvo por recientes afirmaciones de una detección en el contexto específico de estudios estadísticos de curvas de rotación de galaxias espirales (ver Haghi et al., 2016, y Chae et al., 2020b).

En ausencia de una versión covariante definitiva de MoND, es enteramente posible que en surja un límite de bajas velocidades para una teoría final, donde el Efecto de Campo Externo desaparezca (v.g. Milgrom, 2011), o que dicho efecto pueda tener una dependencia en masa o escalamiento, distinto a lo que resulta en versiones actuales de MoND mejor estudiadas. Muchas teorías de Gravedad Modificada con un límite de bajas velocidades han sido propuestas también, donde los detalles, o inclusive la existencia del Efecto de Campo Externo falta por ser explorada.

Más allá de cualquier interpretación teórica, los resultados aquí presentados sugieren una fenomenología *á la* Tully-Fisher bariónica en escalas estelares, lo cual sin duda augura investigaciones posteriores, a la espera de una confirmación definitiva una vez

que la muestra actual pueda ser significativamente aumentada, es decir, una vez que los resultados completos de *Gaia* estén disponibles, con el incremento significativo esperado en la cantidad de estrellas con velocidades radiales confiables, o el advenimiento de futuras generaciones de muestreos. Ya sea que los resultados presentados sean una consecuencia de distribuciones de terciarias ocultas finamente ajustadas, errores astrométricos sistemáticos desconocidos, o bien una indicación de una modificación de la gravedad para un régimen de bajas aceleraciones, será una pregunta cuya respuesta se espera poder obtener en los próximos años.

Posterior a la publicación de los artículos resumidos en este trabajo de tesis, durante los últimos dos años aparecieron cuatro trabajos importantes en el tema, Chae, 2023a, Hernandez et al., 2023, Chae, 2023b and Hernandez, 2023, que muestran aspectos interesantes y aclaran varios de los puntos tratados en los artículos presentados en este trabajo. Los cuatro trabajos mencionados cubren una gama amplia de estrategias independientes en cuanto a selección de la muestra y tratamiento estadístico del problema, usando siempre datos nuevos del catalogo GAIA DR3, que representa una mejora substancial en calidad y numero de objetos disponibles con respecto a los catálogos anteriores usados en esta tesis. La conclusión de los cuatro trabajos arriba mencionados es que en el rango de separaciones proyectadas < 2000 UA, las binarias abiertas locales siguen detalladamente predicciones Newtonianas, como se sugería ya en los artículos descritos en esta tesis. Para el rango de separaciones > 2000 UA, los cuatro artículos mencionados coinciden en mostrar que las binarias abiertas locales exhiben una cinemática detalladamente consistente con predicciones de MOND, incluyendo la presencia del Efecto del Campo Externo, en resumen (Banik y Zhao, 2018) orbitas Keplerianas, pero con un valor efectivo de la constante gravitacional de 1.5G.

Lo primero a notar es la confirmación independiente usando datos sustancialmente mejorados del resultado principal de esta tesis: se confirma la presencia de una anomalía gravitacional en el régimen de bajas aceleraciones a escala estelar, en sistemas donde la presencia de la hipotética materia obscura no hace sentido. Un segundo punto es entender que la señal plana que se observó en esta tesis, en los valores RMS de las velocidades relativas, en términos de valores promedios o medianos, aparece como una transición a un régimen Newtoniano con $G \rightarrow 1.5G$. De hecho, en Chae, 2023b y Hernandez et al., 2023, al estudiar los detalles de la distribución de velocidades relativas, muestran de manera independiente que, después de una zona de transición localizada a partir de las 2000 UA, las distribuciones detalladas de velocidades relativas tienden a expectativas Keplerianas, pero con $G \rightarrow 1.5G$. Lo anterior como resultado de considerar cuidadosamente todos los efectos de proyección a través de las funciones de distribución probabilísticas de los ángulos involucrados en el problema, las distribuciones de elipticidades, y el muestreo dinámico de las orbitas involucradas.

Como trabajo a futuro y principal punto a investigar en el tema, queda encontrar los detalles de la transición entre el régimen Newtoniano y el régimen MOND de $G \rightarrow 1.5G$. Los números de binarias disponibles para estudios detallados que garanticen la ausencia de contaminación cinemática son todavía demasiado bajos para permitir acotar y entender la manera en la que se da esta transición. Se espera que catálogos futuros permitan esto, que permitirá informar el desarrollo de teorías covariantes con limites MONDianos, consistentes con observaciones astronómicas. Finalmente, notamos la puesta en marcha de varios programas observacionales para intentar detectar, o en su caso excluir, la presencia de terciarias escondidas en alguno de los componentes de las binarias

abiertas estudiadas. Esto permitirá finalmente excluir categóricamente la presencia de componentes de contaminación cinemática como responsables de la anomalía gravitacional detectada.

Apéndice A

Challenging a Newtonian prediction though Gaia wide binaries

International Journal of Modern Physics D
Vol. 28, No. 8 (2019) 1950101 (19 pages)
© World Scientific Publishing Company
DOI: 10.1142/S0218271819501013

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Challenging a Newtonian prediction through Gaia wide binaries

X. Hernandez*, R. A. M. Cortés† and Christine Allen‡

Instituto de Astronomía,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Apartado Postal 70–264, C. P. 04510,
Ciudad de México, México
**xavier@astro.unam.mx*
†rcortes@astro.unam.mx
‡chris@astro.unam.mx

R. Scarpa

Instituto de Astrofísica de Canarias, c/via Lactea s/n,
San Cristobal de la Laguna 38205, Spain

Departamento de Astrofísica,
Universidad de La Laguna (ULL),
38206 La Laguna, Tenerife, Spain
riccardo.scarpa@gtc.iac.es

Received 15 January 2019
Revised 6 March 2019
Accepted 7 March 2019
Published 11 April 2019

Under Newtonian dynamics, the relative motion of the components of a binary star should follow a Keplerian scaling with separation. Once orientation effects and a distribution of ellipticities are accounted for, dynamical evolution can be modeled to include the effects of Galactic tides and stellar mass perturbers, over the lifetime of the solar neighborhood. This furnishes a prediction for the relative velocity between the components of a binary and their projected separation. Taking a carefully selected small sample of 81 solar neighborhood wide binaries from the *Hipparcos* catalog, we identify these same stars in the recent Gaia DR2, to test the prediction mentioned using the latest and most accurate astrometry available. The results are consistent with the Newtonian prediction for projected separations below 7000 AU, but inconsistent with it at larger separations, where accelerations are expected to be lower than the critical $a_0 = 1.2 \times 10^{-10}\,\mathrm{m.s}^{-2}$ value of MONDian gravity. This result challenges Newtonian gravity at low accelerations and shows clearly the appearance of gravitational anomalies of the type usually attributed to dark matter at galactic scales, now at much smaller stellar scales.

Keywords: Gravitation; star binary; general.

PACS Number(s): 04.50.Kd, 95.35.+d, 97.10.Vm, 97.80.d

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

1. Introduction

In galactic dynamics, the range of systems over which gravitational anomalies appear in the low acceleration regime extends across vast astronomical scales. Ultra-faint dwarf galaxies with scale radii of order of few tens of parsecs show stellar velocity dispersions implying Newtonian mass to light ratios in the hundreds or even thousands.[1] The classical dwarfs have sizes of order of a kpc and mass to light ratios derived from observed stellar kinematics inconsistent with those of naked stellar populations under standard gravity by well over an order of magnitude.[2] This reflects what is observed in spiral galaxies at tens of kpc, where rotation curves[3] again yield dynamics not corresponding to Newtonian dynamics, given the empirically determined matter content. The trend has been recently extended to include elliptical galaxies observed out to their external low acceleration regions by Ref. 4, and even for the case of Galactic globular clusters, velocity dispersion profiles suggest a change away from Newtonian dynamics for low accelerations.[5,6]

Empirically, the above gravitational anomalies can be described by MONDian dynamics,[7,8] where below an acceleration threshold of $a_0 = 1.2 \times 10^{-10}\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$, kinematics stop falling along Newtonian expectations of $v \propto R^{-1/2}$ to flatten out at the Tully–Fisher values of $V_{\mathrm{TF}} = (GMa_0)^{1/4}$ for centrifugal equilibrium velocities or corresponding velocity dispersions for pressure supported systems, where M is the total baryonic mass of the system in question. The standard interpretation of these observations is the presence of dominant halos of a yet undetected hypothetical dark matter component surrounding the astrophysical systems being observed.

Wide binary pairs in the solar neighborhood offer an opportunity to probe dynamics at low accelerations on the smallest astrophysical scales. In principle, these can yield crucial restrictions on the structure of gravity at low accelerations and lengths where the presence of dark matter is not expected. For a solar mass binary, at separations of above 3.4×10^{-2} pc, 7000 AU, accelerations will fall below a_0 under Newtonian expectations. A first attempt in this direction was made by two of us in Ref. 9 where we used Ref. 10 — henceforth SO11 — a carefully selected sample of *Hipparcos* wide binaries. This catalog includes a full Bayesian model and use of local five-dimensional phase-space density to identify wide binary candidates and rigorously assign a probability that each candidate forms a physical system, rather than being the result of chance associations.

Retaining a sample of binaries from SO11 where contamination was limited to less than 10%, in Ref. 9, results indicated relative velocities for the binary pairs studied above the Newtonian expectations for accelerations below a_0. This remained true even after accounting for projection effects, ellipticity distributions and disruption and evolution of ionized binaries due to the Galactic tidal field and encounters with field stars and stellar remnants, as modeled by Ref. 11, albeit the relatively large errors in proper motions present in the *Hipparcos* catalog.

One of us, in Ref. 12, explored the problem using a small sample of 60-candidate wide binaries with projected separations between 0.004 pc and 1.0 pc. That study

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

found that a number of wide binaries are capable of surviving the galactic tides and stellar encounters of the solar neighborhood dynamical environment with a small sub-sample of the widest pairs showing kinematics more consistent with MONDian dynamics than Newtonian ones. More recently, theoretical studies by Refs. 13 and 14 confirmed that Gaia data, in terms of expected number of detected wide binaries and confidence intervals for the relevant proper motions and parallaxes, are sufficient to detect MONDian deviations from Newtonian dynamics in the low acceleration regime probed by these systems, should they be present.

The obvious next step is to reproduce the careful and detailed procedure presented in SO11, but using this time the Gaia DR2 catalog. This painstaking approach will ultimately furnish a definitive answer regarding the presence of gravitational anomalies at stellar scales in the low acceleration regime, but is currently hampered by our incomplete understanding of the problems still present in the data of the very novel Gaia DR2. For example, only about two thirds of the Hipparcos2 sources have Gaia DR2 counterparts.[15] Also, Gaia treats all binaries closer than about $1''$ (depending on the magnitude difference) as single sources, which may give anomalous parallaxes, and the parallax solutions may be more sensitive to duplicity in certain areas, etc. (See Ref. 16, A1 for some of the known issues.)

A first-order sampling of the issue can be more directly probed by taking advantage of the correspondence between the Gaia and the *Hipparcos* catalogs. One can take the sample selection from the accurate Bayesian analysis of SO11 and the actual astrometric data from the Gaia DR2. Here, we present the results of such an approach, yielding a small sample of 81 wide binaries from the original SO11 catalog having a $< 10\%$ probability of being chance associations, Gaia DR2 data consistent with the original *Hipparcos* reported quantities, and consistent parallaxes for both components in the Gaia DR2. Although it is only a reduced sample, the superior quality of the Gaia satellite allows us to infer relative velocities for the binaries in question to a much higher degree of accuracy than what was available in Ref. 9. Interestingly, our results show a departure from Newtonian predictions as projected separations grow beyond the critical 0.034 pc. Indeed, our new results are consistent with what was reported in Ref. 9: the mean values of the inferred relative velocities are essentially unchanged with the error bars showing a dramatic reduction. This effectively rules out the Newtonian prediction of Ref. 11 and provides solid evidence for a gravitational anomaly in the low acceleration regime, this time at stellar scales.

2. Sample Selection

As outlined in the introduction, the sample selection is based on the wide binary catalog of SO11, which was constructed using a very detailed Bayesian procedure. This identifies and quantifies the probability of each binary pair being an actual physical system, rather than the result of projection effects or chance associations, including also the Tycho-2 and the *Tycho* double star catalogs.[17,18] To that end, a

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

five-dimensional space of spatial positions and proper motions was cross-correlated with a galactic phase-space density library, explicitly excluding the largest-known local star clusters, to identify binary candidates as significant local overdensities in phase-space. Corrections due to spherical projections effects were also considered to yield a catalog of 840 wide binaries with projected separations between 0.003 pc and 10 pc and, crucially, a well-determined probability of chance association, $P_{\rm ch}$. Taking only those pairs where this probability satisfies $P_{\rm ch} < 10\%$ reduces the original SO11 sample to 359 wide binaries. This catalog is also narrowly restricted in spectral type for both primaries and companions of each binary, yielding stars in a narrow range of masses centered on $0.5M_{\odot}$. This last one is important as it allows a clean comparison to the fixed mass binary simulations of Ref. 11, see as follows. Following the original SO11 terminology, the brightest star in each binary system is termed the primary.

The SO11 search criteria ensure the absence of near neighbors, and result in binary candidates with separations which are always many times smaller than the typical interstellar separations at the location of the binaries in question. Extensive testing with synthetic samples in SO11 guarantees that the catalog includes very few multiple systems with undetected extra companions and is highly complete in 6 pc to 100 pc distance range from the Sun.

We now take advantage of the *Hipparcos* to Gaia DR2 correspondence availability to search for the updated astrometry of the 359 $P_{\rm ch} < 10\%$ wide binary SO11 sample in the Gaia DR2. The search returns only 151 pairs where each component of the SO11 binaries appears in the Gaia DR2 with two proper motion parameters and measured parallax. This is not surprising since only about two thirds of the Hipparcos2 sources have Gaia DR2 counterparts.[15] It is not yet clear why there are so many sources missing. According to the above authors, a combination of effects may be present. As each binary is excluded if either component is absent from the DR2, the fraction we obtain is typical. Next, the SO11 catalog returns a few systems where more than one secondary is identified as the companion to a given primary, and also cases where a single secondary is identified as the companion to more than one primary. We remove all these cases of multiple identifications, bringing the sample down to 131 binaries.

A first test of the reliability with which the *Hipparcos* binaries have been identified in the Gaia DR2 comes from comparing the proper motion measurements reported in SO11 with the corresponding measurements reported in the Gaia DR2. This is shown in Figs. 1 and 2 where the ranges shown in the axes were chosen so as to display most of our sample clearly; a handful of very discordant systems do not appear in the plots as they are very far from the identity line shown. It is clear that in most cases, the proper motion values reported by both satellites are in agreement with each other, within their respective confidence intervals, the *Hipparcos* error ranges being much larger than the Gaia DR2 ones. Still, we introduce a cut to remove from consideration any binary candidate where for any component, the *Hipparcos* and Gaia DR2 proper motions are more than 3σ from each other.

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

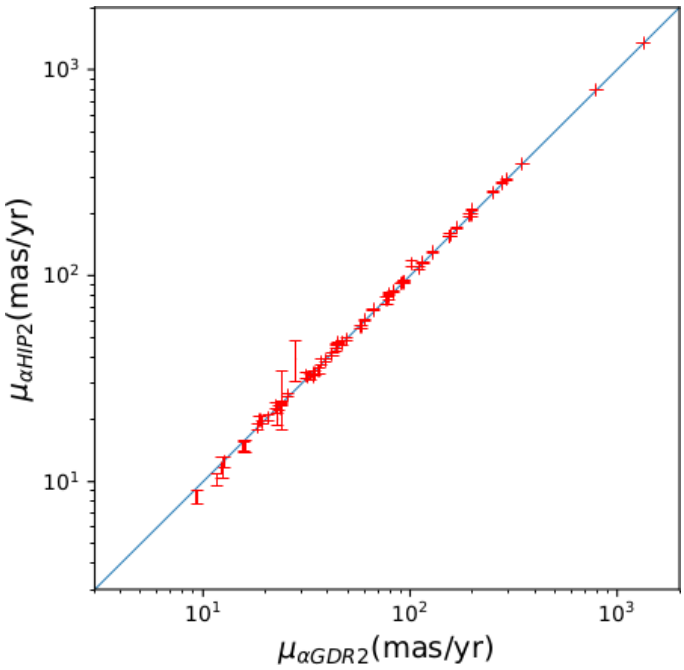

Fig. 1. Comparison of SO11 *Hipparcos* and Gaia DR2 proper motion data in right ascension for each of the two components of the binaries studied. The agreement with the identity line in the majority of cases shows that the stars in question have been successfully identified from the first catalog to the Gaia DR2 sample.

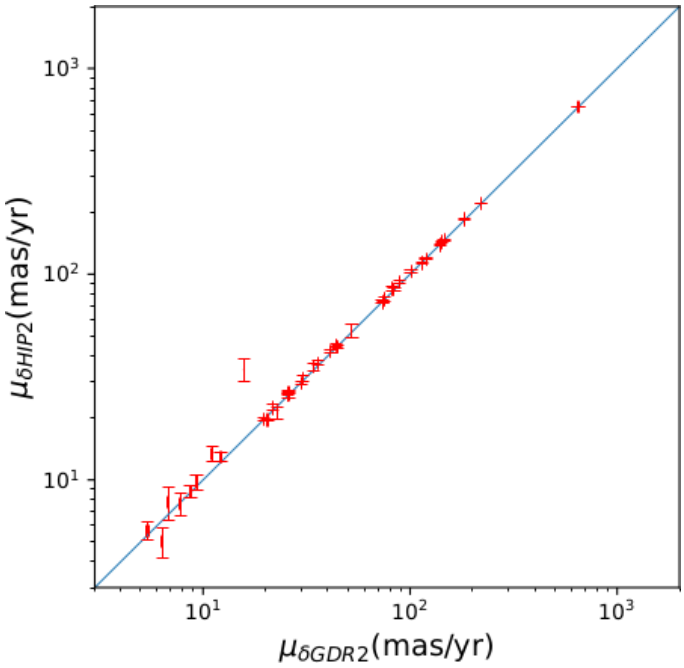

Fig. 2. Comparison of SO11 *Hipparcos* and Gaia DR2 proper motion data in declination for each of the two components of the binaries studied. The agreement with the identity line in the majority of cases shows that the stars in question have been successfully identified from the first catalog to the Gaia DR2 sample.

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

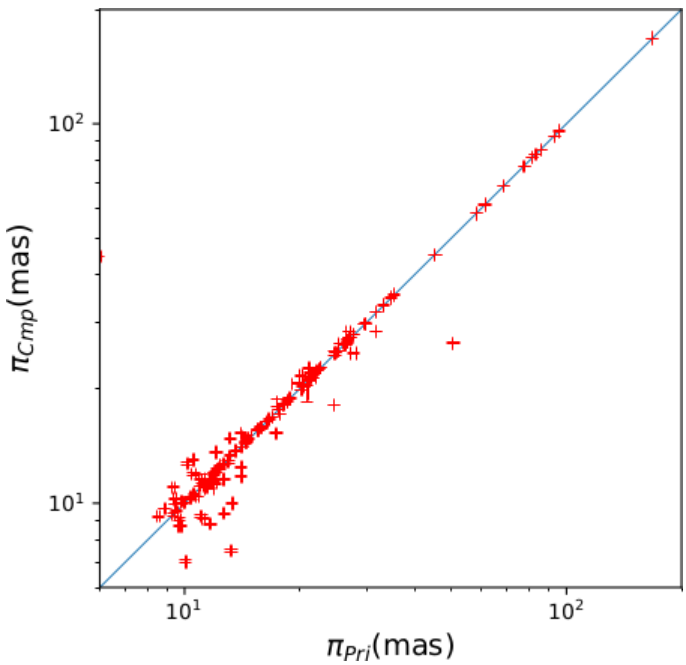

Fig. 3. Comparison of the Gaia DR2 reported parallax for the two distinct components of each of the binaries studied. The disagreement of only a handful of cases with the identity line allows to exclude such discordant pairs as part of the expected 10% misidentified binaries in the original SO11 catalog or as misidentified stars going from the *Hipparcos* catalog to the Gaia DR2.

Our final results are not sensitive to this threshold, provided the few discordant misidentified binaries are removed. This cut leaves us with only 117 stellar pairs. Next, as shown in Fig. 3, we check that the Gaia DR2 reported parallax measurements for each of the primaries and companions are not discordant, and remove from the sample any binary where the distances to each component are not within 13% of each other. This exclusion criterion identifies 17 candidates, thus reducing the sample to 100 pairs. Note that the test shown in Figs. 1 and 2 effectively gives us a 10-year baseline which, on top of the robustness in the SO11 catalog towards multiple systems, where no radial velocities are involved, removes any remaining binary where a third component might be altering proper motions with timescales shorter than 10 years (see Ref. 14).

Finally, we take advantage of the Gaia radial velocity measurements (when available) and remove any binaries where the radial velocity difference, ΔV_r, between both components is larger than $4\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. The resulting cut is not very sensitive to this velocity threshold, as the removed binary pairs typically have much larger and discordant ΔV_r values, with an average value for those removed of $\Delta V_r = 28\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Our final sample comprises 81 binary pairs.

Thus, we have preferred very strict cuts to our final sample which leave us with modest numbers, but guarantee the exclusion of misidentified stars going from *Hipparcos* data to Gaia DR2 and chance alignment contamination in the original SO11 catalog, all of which become conspicuous in the comparisons presented in this section. Table 1 summarizes the Gaia DR2 properties used and catalog numbers

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. *Hipparcos* and Gaia identification numbers for the 133 binary stars used together with Gaia DR2 data and results of the exclusion tests performed: "a" shows an individual star excluded (which results in the exclusion of the respective binary) for having an inconsistent proper motion in right ascension between *Hipparcos* and the DR2, "b" shows the corresponding result for declination, "c" shows a binary excluded for having discordant parallaxes to both components (distance differences larger than 13%) in the DR2 data and "d" gives binaries removed for having DR2 radial velocity differences $> 4\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ with the 81 retained binaries appearing blank in this column. Upper rows give data of primaries and lower ones of secondaries.

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
16	15371	4722135642226356736	49.565826	−62.503574	1331.151 ± 0.355	648.523 ± 0.431	12.01 ± 0.32	12.046 ± 0.027		
	15330	4722111590409480064	49.454851	−62.572523	1337.591 ± 0.142	649.930 ± 0.154	12.21 ± 0.17	12.039 ± 0.011	-1.744 ± 0.002	
17	17414	43335880716390784	55.969727	16.670667	157.945 ± 0.086	-316.326 ± 0.052	34.18 ± 0.15	17.209 ± 0.012		
	17405	43335537119008896	55.939232	16.665933	156.215 ± 0.089	-310.291 ± 0.064	34.22 ± 1.08	17.239 ± 0.014	-2.051 ± 0.001	
21	19859	3285218186904332288	63.869527	6.186399	-109.700 ± 0.095	-107.368 ± 0.079	-7.21 ± 0.15	22.087 ± 0.026		
	19855	3285218255623808640	63.857006	6.199170	-101.763 ± 0.080	-111.982 ± 0.055	-7.93 ± 0.16	22.104 ± 0.022	-2.163 ± 0.001	
22	23693	4763906879239461632	76.377477	−57.472197	-32.140 ± 0.276	117.417 ± 0.310	-1.15 ± 0.22	11.625 ± 0.020		
	23708	4763897739549071744	76.447122	−57.553318	-32.784 ± 0.049	119.633 ± 0.054	-0.88 ± 0.16	11.698 ± 0.003	-1.740 ± 0.001	
25	25278	3400292798990117888	81.107227	17.383504	250.765 ± 0.316	-7.332 ± 0.209	37.67 ± 0.24	14.585 ± 0.037		
	25220	3394298532176344960	80.911047	17.324092	251.000 ± 0.092	-5.778 ± 0.068	37.94 ± 0.13	14.565 ± 0.011	-1.301 ± 0.001	
28	26690	3395863205942142976	85.075658	15.350146	2.551 ± 0.100	-36.058 ± 0.080		167.953 ± 2.110		
	26844	3347826784173590656	85.495633	15.337041	79.115 ± 0.087	-43.071 ± 0.068		22.423 ± 0.025	-0.172 ± 0.010	c
29	26779	263916708025623680	85.334752	53.478804	2.784 ± 0.075	-523.602 ± 0.072	1.07 ± 0.18	12.280 ± 0.007		
	26801	263916742385357056	85.378072	53.487581	3.915 ± 0.078	-515.938 ± 0.078	1.92 ± 0.27	12.278 ± 0.008	-2.234 ± 0.001	
65	62229	6060965699625586176	191.308450	−57.358567	-201.033 ± 0.052	-131.548 ± 0.046	14.76 ± 0.16	19.808 ± 0.018		
	69570	6092573252981419776	213.602784	−48.147162	-102.218 ± 0.095	-121.897 ± 0.120	-23.92 ± 0.13	37.842 ± 0.087	0.910 ± 0.002	c,d
73	70529	1254695603704323712	216.434870	23.612274	792.548 ± 0.092	-1116.601 ± 0.111	8.78 ± 0.21	16.346 ± 0.014		
	70536	1254694882149817728	216.448113	23.615657	793.487 ± 0.085	-1119.010 ± 0.095		16.339 ± 0.014	-2.445 ± 0.004	
80	79755	1642641410934267008	244.172569	67.239204	-498.018 ± 0.050	84.110 ± 0.053	-19.86 ± 0.19	10.768 ± 0.004		
	79762	1642642957122493824	244.183431	67.256628	-483.168 ± 0.066	89.266 ± 0.072		10.765 ± 0.005	-2.473 ± 0.001	
81	80337	6018047019138644480	246.005789	−39.192966	74.146 ± 0.306	3.666 ± 0.226	12.89 ± 0.13	12.908 ± 0.023		
	80300	6018034958869558912	245.891422	−39.229487	77.135 ± 0.147	0.334 ± 0.110		12.914 ± 0.012	-1.666 ± 0.001	
85	83591	4364527594192166400	256.260183	−5.071414	-916.562 ± 0.155	-1138.804 ± 0.104	34.14 ± 0.15	10.466 ± 0.007		
	83599	4364480521350598144	256.303450	−5.099110	-917.276 ± 0.098	-1131.947 ± 0.065	34.44 ± 0.44	10.456 ± 0.006	-2.029 ± 0.001	
87	84405	4109030160308317312	258.835189	−26.607739	-466.541 ± 0.646	-1142.063 ± 0.451		5.960 ± 0.008		
	84478	4109034455276324608	259.053369	−26.550990	-479.850 ± 0.101	-1124.545 ± 0.068	-0.04 ± 0.22	5.950 ± 0.003	-1.675 ± 0.001	b
112	493	2797111130991722240	1.477436	18.234370	-150.936 ± 0.121	-147.985 ± 0.089	-45.70 ± 0.16	37.429 ± 0.102		
	495	2773086595766697856	1.480470	18.075245	-147.614 ± 0.094	-145.798 ± 0.079	-45.00 ± 0.74	37.683 ± 0.085	-0.982 ± 0.002	

(*Continued*)

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
130	7699	4911275281704066048	24.782478	−56.429512	91.146 ± 0.041	-31.652 ± 0.041	9.48 ± 0.31	46.855 ± 0.061		
	6485	4909846500703006976	20.839305	−57.480902	92.790 ± 0.045	-36.082 ± 0.038	8.62 ± 0.21	45.315 ± 0.053	0.284 ± 0.001	
132	9487	2517584007848935808	30.511899	2.763759	32.692 ± 0.940	-2.895 ± 0.821		50.506 ± 1.707		
	9519	2517585927699042944	30.611532	2.815808	36.368 ± 0.126	-10.811 ± 0.098	4.58 ± 0.16	48.404 ± 0.137	-1.014 ± 0.016	b
140	11477	4967177781457918976	37.007194	−33.811016	18.526 ± 0.121	5.163 ± 0.193		47.258 ± 0.315		
	11448	4967153630858709120	36.926542	−33.896542	18.383 ± 0.030	4.481 ± 0.052	12.26 ± 0.17	47.708 ± 0.075	-1.046 ± 0.004	b
155	15304	10584899657116672	49.360666	7.655784	166.360 ± 0.071	-6.237 ± 0.062	31.35 ± 0.20	47.288 ± 0.092		
	15310	10608573516849536	49.387317	7.690127	168.749 ± 0.073	-6.314 ± 0.063	31.90 ± 0.15	47.269 ± 0.088	-1.447 ± 0.002	
157	15527	5060104351007433472	50.016623	−28.854353	349.057 ± 0.036	-65.299 ± 0.041	39.89 ± 0.13	36.024 ± 0.041		
	15526	5060105892897388288	50.013976	−28.784118	348.847 ± 0.065	-66.663 ± 0.076	40.31 ± 0.14	36.009 ± 0.052	-1.355 ± 0.001	
173	22534	4777112872882315264	72.734825	−53.459330	-80.769 ± 0.929	85.658 ± 0.968	6.44 ± 3.13	38.970 ± 0.624		
	22562	4777119126354782592	72.835038	−53.405518	-82.413 ± 0.043	83.684 ± 0.052	10.70 ± 0.49	38.006 ± 0.032	-1.268 ± 0.008	d
175	24046	3422042582096699520	77.517088	27.556119	197.860 ± 0.093	-89.579 ± 0.056	15.64 ± 0.16	40.470 ± 0.074		
	24035	3422047495539178496	77.504564	27.642799	198.179 ± 0.596	-88.591 ± 0.357	21.24 ± 0.43	40.295 ± 0.457	-1.210 ± 0.006	a,b,d
187	33705	5607190344506642432	105.040814	−31.141532	18.789 ± 0.043	35.596 ± 0.049	16.61 ± 0.17	38.123 ± 0.043		
	33691	5607189485513198208	105.011544	−31.227929	18.893 ± 0.061	36.119 ± 0.065	16.83 ± 0.21	38.356 ± 0.061	-1.222 ± 0.001	
190	34714	890422213103244544	107.830615	33.111833	-110.510 ± 0.075	-7.495 ± 0.066	3.05 ± 0.24	45.125 ± 0.095		
	34700	890346243721923968	107.810770	32.614987	-110.866 ± 0.102	-6.789 ± 0.088	3.02 ± 0.33	44.748 ± 0.143	-0.409 ± 0.002	
195	37718	5493209501673364736	116.051359	−50.456108	-114.435 ± 0.047	143.459 ± 0.042	8.69 ± 0.37	30.084 ± 0.022		
	37727	5493209437253410432	116.067894	−50.466001	-111.783 ± 0.060	142.603 ± 0.053	9.16 ± 0.30	30.080 ± 0.027	-2.120 ± 0.002	
201	42401	5746824674801810816	129.688303	−13.256527	-63.858 ± 0.051	38.374 ± 0.041	20.53 ± 0.25	31.596 ± 0.032		
	41662	5751951182125903872	127.418304	−9.976270	-56.556 ± 0.064	34.122 ± 0.050	2.30 ± 0.24	35.328 ± 0.055	0.364 ± 0.001	d
204	43970	610526719204475136	134.312562	15.322854	60.337 ± 0.292	19.748 ± 0.221		48.401 ± 0.415		
	44001	610549499710989440	134.396934	15.581374	60.440 ± 0.161	20.509 ± 0.106		48.801 ± 0.233	-0.638 ± 0.006	
207	44858	692119656035933568	137.099198	27.535750	-53.239 ± 0.128	71.659 ± 0.096	30.02 ± 0.22	48.891 ± 0.237		
	44864	692120029700390912	137.112900	27.543447	-51.819 ± 0.113	73.524 ± 0.074	30.31 ± 0.14	49.124 ± 0.230	-1.910 ± 0.007	
215	51312	749786562715192320	157.213545	34.885408	-111.186 ± 0.069	-62.017 ± 0.069	4.11 ± 0.17	49.344 ± 0.126		
	52140	748360706587700352	159.782027	32.832960	-110.338 ± 0.106	-58.939 ± 0.087	-0.60 ± 0.17	50.382 ± 0.138	0.411 ± 0.002	d
218	52787	3550081879381593728	161.879229	−22.348154	-124.690 ± 0.115	-28.341 ± 0.084	23.85 ± 0.25	33.612 ± 0.085		
	52776	3550084490721711872	161.855204	−22.286843	-124.539 ± 0.112	-29.837 ± 0.070	23.24 ± 0.52	33.603 ± 0.079	-1.417 ± 0.002	
224	55765	3967618155853506304	171.400912	16.456513	-142.347 ± 0.204	-5.645 ± 0.179	18.88 ± 0.67	47.198 ± 0.296		
	55262	3965063921622777856	169.776912	13.390754	-146.589 ± 0.080	-0.006 ± 0.069	8.33 ± 0.21	47.472 ± 0.093	0.454 ± 0.004	d

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
229	58067	3975129194660883328	178.631559	19.411157	-450.502 ± 0.095	-16.554 ± 0.069	5.94 ± 0.29	39.622 ± 0.082		
	58073	3975223065466473216	178.644111	19.427759	-450.600 ± 0.083	-15.497 ± 0.058	5.76 ± 0.22	39.601 ± 0.071	-1.851 ± 0.002	
230	58085	5236197322996128128	178.686141	-66.376482	13.792 ± 0.037	-65.816 ± 0.036	-6.80 ± 0.37	44.078 ± 0.047		
	58121	5236196498362394112	178.814952	-66.409354	12.724 ± 0.048	-63.279 ± 0.045	-7.63 ± 0.13	44.016 ± 0.063	-1.328 ± 0.001	b
245	64057	3945118265299248128	196.914217	24.010449	-261.638 ± 0.077	148.003 ± 0.059	-1.68 ± 0.15	37.442 ± 0.053		
	64059	3945118643256370688	196.918496	24.020558	-262.455 ± 0.078	146.042 ± 0.054	-1.70 ± 0.13	37.433 ± 0.051	-2.150 ± 0.003	
253	67246	3721126409323324416	206.735799	6.349899	-510.447 ± 0.071	-110.225 ± 0.064	-30.42 ± 0.20	31.489 ± 0.039		
	67291	3721114933170707328	206.867792	6.315179	-509.440 ± 0.083	-111.022 ± 0.061	-30.67 ± 0.15	31.332 ± 0.045	-1.128 ± 0.001	
264	73365	1586977844504488576	224.886978	45.464606	-33.680 ± 0.043	100.046 ± 0.044	-18.94 ± 0.14	33.745 ± 0.027		
	73360	1586977737129182848	224.877247	45.448463	-35.321 ± 0.037	101.074 ± 0.039	-18.99 ± 0.26	33.768 ± 0.024	-1.986 ± 0.002	
270	74666	1278391075716738560	228.876113	33.314351	82.549 ± 0.554	-111.909 ± 0.560		37.342 ± 0.531		a
	74674	1278392381386793856	228.910214	33.320448	82.776 ± 0.040	-110.040 ± 0.044	-11.83 ± 0.18	36.948 ± 0.042	-1.724 ± 0.009	
271	75104	1277115023753077248	230.207752	31.480707	-179.339 ± 0.036	139.058 ± 0.039	-26.82 ± 0.17	45.885 ± 0.055		
	75011	1277185633015465856	229.916339	31.843109	-181.021 ± 0.033	139.573 ± 0.042	-26.32 ± 0.19	45.433 ± 0.057	-0.456 ± 0.001	
284	79958	5931674608438449792	244.816099	-55.504655	5.669 ± 0.067	18.412 ± 0.051	-0.31 ± 0.52	28.113 ± 0.029		
	80365	5831891213733627264	246.077754	-59.344070	-3.205 ± 0.063	-5.572 ± 0.052		7649.524 $\pm$ 2501.324	2.417 ± 0.283	c
298	85620	1440518669436791296	262.435226	63.851870	1.533 ± 0.049	-182.061 ± 0.053	-34.02 ± 0.16	45.738 ± 0.051		
	85575	1440425863783337856	262.319088	63.868353	0.864 ± 0.053	-181.967 ± 0.060	-33.72 ± 0.18	45.663 ± 0.060	-1.368 ± 0.001	
309	92388	4505477838068264064	282.408880	13.217640	-199.313 ± 0.096	-223.979 ± 0.102	-54.54 ± 0.21	37.760 ± 0.068		
	92638	4312046495498949888	283.121483	11.209184	-189.830 ± 0.070	-224.477 ± 0.079	-22.45 ± 0.90	38.302 ± 0.065	0.150 ± 0.002	d
314	94150	6421542154150684160	287.472100	-68.424635	155.088 ± 0.122	-42.976 ± 0.141	-9.61 ± 0.12	36.982 ± 0.122		
	94154	6421555485729063424	287.479128	-68.299872	155.710 ± 0.036	-41.937 ± 0.046	-9.28 ± 0.13	36.655 ± 0.041	-1.096 ± 0.002	
322	97384	4240508901699614976	296.888713	1.087910	-28.713 ± 0.067	-226.754 ± 0.046		47.116 ± 0.093		
	95829	4287506873404614784	292.359656	0.527119	-25.932 ± 0.072	-237.555 ± 0.070		44.067 ± 0.083	0.560 ± 0.002	
323	97940	4240626686883261184	298.562299	1.942265	-1.562 ± 0.085	-270.206 ± 0.052	9.55 ± 0.16	40.151 ± 0.097		
	97950	4240625896609242624	298.607267	1.940219	-0.186 ± 0.077	-269.831 ± 0.047	10.20 ± 0.20	40.047 ± 0.087	-1.502 ± 0.002	
325	99171	4236276194243977344	302.008090	-0.678476	115.520 ± 0.095	-67.593 ± 0.060	-3.27 ± 0.14	46.678 ± 0.137		
	99100	4235895935019949952	301.788725	-0.874544	115.276 ± 0.104	-67.915 ± 0.050	-3.08 ± 0.14	46.633 ± 0.144	-0.621 ± 0.003	
326	99572	6879764552737781888	303.108646	-12.618340	193.068 ± 0.111	-195.497 ± 0.064	27.30 ± 0.16	28.249 ± 0.054		
	99550	6879662263797806976	303.040242	-12.893999	192.627 ± 0.068	-193.957 ± 0.045	27.53 ± 0.25	28.248 ± 0.033	-0.854 ± 0.001	
331	100896	4228891667990334976	306.864400	-2.103364	-64.779 ± 0.352	-67.523 ± 0.216		49.464 ± 0.479		
	100895	4228891221313732864	306.861958	-2.119817	-61.630 ± 0.099	-69.039 ± 0.057	-14.70 ± 0.17	46.078 ± 0.108	-1.858 ± 0.006	
342	106353	6830027182179257472	323.096671	-20.957957	-279.074 ± 0.103	-124.241 ± 0.086	32.57 ± 0.16	28.740 ± 0.061		
	106350	6830027143525634432	323.086142	-20.970035	-284.665 ± 0.091	-123.311 ± 0.075	33.62 ± 0.28	28.738 ± 0.053	-2.107 ± 0.004	

(*Continued*)

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
344	107299	6458951765971500672	325.995032	−57.325475	-116.563 ± 0.062	-52.575 ± 0.054	36.95 ± 0.20	44.462 ± 0.089		
	107300	6458952345790198144	326.000646	−57.283282	-115.298 ± 0.049	-52.865 ± 0.045	37.16 ± 0.16	44.373 ± 0.066	-1.484 ± 0.002	
352	110084	6613555642140332672	334.478622	−32.479717	163.485 ± 0.077	-203.690 ± 0.078	-77.34 ± 0.20	47.692 ± 0.111		
	111520	6620888290706789248	338.918255	−28.133824	198.181 ± 1.765	-163.762 ± 1.749	1.78 ± 0.54	51.467 ± 2.529	0.700 ± 0.023	d
359	112724	2211820991079869312	342.419369	66.199867	-63.663 ± 0.625	-125.772 ± 0.633		37.163 ± 0.525		
	112324	2007431640735691776	341.264616	58.146467	-62.565 ± 0.062	-135.767 ± 0.059	-10.25 ± 0.18	35.353 ± 0.046	0.708 ± 0.007	
366	114131	6541802406664428672	346.719425	−43.520412	-49.037 ± 0.621	-13.454 ± 0.651		36.046 ± 0.634		
	114112	6541802578463122688	346.662879	−43.503830	-47.921 ± 0.088	-22.151 ± 0.100	15.37 ± 0.23	40.237 ± 0.143	-1.531 ± 0.010	
381	1266	2428524528072046464	3.966260	−8.876220	42.692 ± 0.099	10.121 ± 0.050	7.21 ± 0.26	98.401 ± 0.465		
	118	2428948114926672128	0.386803	−9.430027	46.899 ± 0.117	1.430 ± 0.085	1.66 ± 0.26	78.579 ± 0.471	0.742 ± 0.005	c,d
384	2292	2526899001640197248	7.316650	−5.911442	-110.351 ± 0.145	-221.185 ± 0.071	9.54 ± 0.18	54.877 ± 0.174		
	2350	2526925389919277056	7.499004	−5.764960	-107.019 ± 0.094	-223.039 ± 0.062	9.77 ± 0.27	55.049 ± 0.155	-0.650 ± 0.003	
392	4702	2356290256259997696	15.117303	−19.389626	128.469 ± 0.101	-54.504 ± 0.062	5.31 ± 0.16	82.225 ± 0.309		
	4833	2356080043380354816	15.529355	−19.669909	129.340 ± 0.085	-54.529 ± 0.061	5.62 ± 0.19	81.436 ± 0.274	-0.165 ± 0.003	
402	6668	315635261093206656	21.393618	31.550204	156.296 ± 0.086	-48.602 ± 0.076	18.27 ± 0.20	63.089 ± 0.207		
	6675	315635192373731328	21.411410	31.545948	155.319 ± 0.086	-50.508 ± 0.075		63.343 ± 0.183	-1.760 ± 0.004	
404	6772	4916890556306664192	21.776124	−51.965451	294.867 ± 0.051	75.327 ± 0.049	49.99 ± 0.18	56.705 ± 0.096		
	6804	4916887395210737024	21.895937	−52.044359	294.046 ± 0.032	75.068 ± 0.033	50.23 ± 0.29	56.764 ± 0.068	-0.971 ± 0.001	
405	7189	4929377881661762944	23.151342	−49.728032	-28.252 ± 0.047	-73.686 ± 0.044	3.37 ± 0.37	81.153 ± 0.209		
	7086	4929369360446613248	22.818624	−49.904326	-28.369 ± 0.040	-75.405 ± 0.044		81.000 ± 0.207	-0.406 ± 0.002	b
417	11137	76300510625993344	35.831622	15.419357	112.396 ± 0.074	184.300 ± 0.061	27.02 ± 0.15	60.120 ± 0.132		
	11134	76300476266255488	35.821737	15.417794	111.098 ± 0.064	183.174 ± 0.050	27.30 ± 0.24	60.105 ± 0.118	-1.994 ± 0.004	
422	11736	2500621360930896640	37.871913	1.091259	-29.750 ± 0.103	-23.012 ± 0.082		107.030 ± 0.560		
	12728	2498487861696380672	40.903989	−0.344632	-26.869 ± 0.069	-25.355 ± 0.073	9.73 ± 0.31	90.724 ± 0.345	0.763 ± 0.004	c
426	13223	31986240656172800	42.554350	13.710430	59.150 ± 0.093	-8.651 ± 0.090	-14.72 ± 15.28	94.865 ± 0.546		
	13122	33216147491735808	42.195278	14.613596	58.013 ± 0.088	-6.609 ± 0.085	30.25 ± 0.21	76.807 ± 0.280	0.161 ± 0.004	c,d
427	13271	4949158198924394496	42.699429	−39.932267	41.760 ± 0.052	-9.937 ± 0.057		96.694 ± 0.329		
	13499	4949081572411575552	43.466162	−40.194081	42.102 ± 0.043	-6.409 ± 0.047	18.12 ± 0.91	96.453 ± 0.291	0.035 ± 0.003	
441	15432	5047006006423053440	49.720802	−36.127117	37.017 ± 0.040	-5.105 ± 0.059		105.680 ± 0.336		
	15152	5046487311812732544	48.821500	−37.041717	38.972 ± 0.039	-5.318 ± 0.057	17.59 ± 0.97	100.649 ± 0.266	0.322 ± 0.003	
445	16410	117916235464382336	52.833080	27.571643	38.561 ± 0.106	-31.966 ± 0.079		104.541 ± 0.602		
	16742	69733883588579840	53.838995	26.852557	28.033 ± 0.088	-31.248 ± 0.069		195.915 ± 1.768	0.478 ± 0.007	c

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
448	16959	4728825002249947904	54.542882	−59.776194	26.094 ± 0.042	43.356 ± 0.047		76.949 ± 0.139		
	16942	4728825036609672576	54.511235	−59.775713	25.698 ± 0.199	44.655 ± 0.207	9.03 ± 2.40	77.615 ± 0.735	-1.668 ± 0.008	
450	17486	4666907551119833984	56.195067	−70.027068	-10.234 ± 0.043	-97.151 ± 0.049	27.65 ± 0.14	55.118 ± 0.069		
	17515	4666907516760096512	56.256345	−70.024519	-9.249 ± 0.048	-97.358 ± 0.050	27.94 ± 0.19	54.988 ± 0.074	-1.693 ± 0.002	
462	20109	4780193841901310336	64.667115	−52.859782	47.538 ± 0.086	72.662 ± 0.154		75.921 ± 0.271		
	20074	4780194185498710144	64.564161	−52.901991	49.705 ± 0.061	73.646 ± 0.100	21.51 ± 0.25	74.962 ± 0.192	-1.005 ± 0.003	a
465	21537	3230677565443833088	69.361411	0.553169	16.653 ± 0.102	11.603 ± 0.057	38.60 ± 0.17	64.132 ± 0.214		
	21534	3230677870385455232	69.358778	0.574687	15.953 ± 0.100	12.163 ± 0.054	38.97 ± 0.17	64.119 ± 0.204	-1.615 ± 0.003	
467	21704	2976981131534077056	69.904334	−21.247450	12.719 ± 0.049	22.037 ± 0.077	9.57 ± 0.16	83.375 ± 0.300		
	21702	2976981337692506240	69.895710	−21.239607	12.411 ± 0.042	22.892 ± 0.046	7.96 ± 0.23	83.051 ± 0.224	-1.788 ± 0.005	
478	25453	3238066592819780608	81.661830	6.868519	9.167 ± 0.097	-32.465 ± 0.080		101.834 ± 0.560		
	25483	3334161160308637312	81.750020	7.170142	9.341 ± 0.102	-33.164 ± 0.089		98.459 ± 0.715	-0.260 ± 0.006	
481	25711	3447142233536837376	82.352673	31.426028	-0.561 ± 0.099	-46.080 ± 0.069		75.565 ± 0.284		
	25614	3447107495841475712	82.083455	31.048402	-2.399 ± 0.088	-53.567 ± 0.066	-21.34 ± 0.30	132.969 ± 1.180	-0.094 ± 0.006	c
484	26309	2907397747897070336	84.043022	−28.708027	25.325 ± 0.054	-3.082 ± 0.073		58.897 ± 0.154		
	26453	2907308172059100544	84.415231	−28.626307	24.080 ± 0.034	-3.100 ± 0.041	26.05 ± 0.45	59.114 ± 0.083	-0.460 ± 0.002	
487	26680	3339560999352744960	85.048812	10.252564	-7.541 ± 0.119	-28.727 ± 0.092	29.53 ± 0.54	82.925 ± 0.369		
	26646	3339565461821955712	84.946518	10.339045	-8.312 ± 0.085	-29.008 ± 0.069	30.69 ± 0.68	82.508 ± 0.328	-0.718 ± 0.004	
489	27069	3023084272561678976	86.106147	−5.464855	14.670 ± 0.080	-23.036 ± 0.085		87.312 ± 0.462		
	26588	3017087261266087552	84.773120	−5.897631	15.729 ± 0.086	-21.779 ± 0.080	25.40 ± 0.74	89.594 ± 0.410	0.333 ± 0.004	
492	27791	3454470100579668992	88.219656	34.444815	-8.834 ± 0.110	-71.574 ± 0.089	-37.59 ± 5.29	89.428 ± 0.675		
	28872	3453690993510788480	91.436317	36.934039	-8.260 ± 0.080	-70.593 ± 0.066	25.30 ± 0.50	109.959 ± 0.579	0.798 ± 0.005	a–d
499	31323	3382205557837836288	98.529539	22.123988	-8.301 ± 0.087	-35.555 ± 0.073		94.444 ± 0.524		
	31316	3382205592197580928	98.515108	22.117513	-7.316 ± 0.092	-34.348 ± 0.076	-26.28 ± 0.30	94.856 ± 0.692	-1.610 ± 0.008	a
510	35341	948509515477490560	109.509153	40.883448	-12.784 ± 0.165	12.065 ± 0.155		95.725 ± 1.022		
	35799	974093501788080384	110.764196	45.000203	-11.563 ± 0.064	-5.904 ± 0.039	32.57 ± 0.27	1029.404 ± 39.123	1.617 ± 0.031	c
525	41081	5322206718812246656	125.729666	−52.123645	-23.039 ± 0.140	19.548 ± 0.117		73.249 ± 0.382		
	40916	5320716335102626048	125.251760	−52.227884	-22.095 ± 0.056	19.644 ± 0.059		72.713 ± 0.138	-0.402 ± 0.003	
527	41880	3076534861386561536	128.092411	−0.937638	-133.683 ± 0.073	83.519 ± 0.053	15.31 ± 0.29	69.099 ± 0.201		
	41881	3076535243639085440	128.096341	−0.927400	-135.608 ± 0.076	81.968 ± 0.056	14.85 ± 0.35	69.356 ± 0.222	-1.878 ± 0.003	
540	45811	5742852762061629056	140.120838	−9.555820	-12.896 ± 0.462	-27.707 ± 0.536	25.14 ± 0.16	68.539 ± 1.707		
	45802	5742848123496954112	140.087475	−9.610300	-13.982 ± 0.178	-29.110 ± 0.155	31.99 ± 1.32	66.917 ± 0.523	-1.124 ± 0.015	d
541	45937	5310444491348428544	140.506149	−54.543106	18.112 ± 0.055	120.947 ± 0.055	91.12 ± 0.16	67.899 ± 0.139		
	45952	5310446621652246144	140.579963	−54.464723	22.511 ± 0.108	114.544 ± 0.121		67.493 ± 0.238	-0.977 ± 0.002	

(*Continued*)

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
542	46298	1131772432806417280	141.620478	78.437919	30.488 ± 0.071	26.021 ± 0.069	-10.71 ± 0.18	53.853 ± 0.117		
	46299	1131771646828736000	141.625549	78.429867	34.502 ± 0.053	25.967 ± 0.066	-11.18 ± 0.21	53.877 ± 0.096	-2.117 ± 0.005	
546	47017	5249310751464090112	143.734891	-64.999265	-34.698 ± 0.058	43.970 ± 0.051	44.93 ± 14.31	87.442 ± 0.228		
	47351	5249282164160875136	144.725079	-64.990582	-34.905 ± 0.051	41.369 ± 0.050	22.62 ± 1.01	90.548 ± 0.222	-0.187 ± 0.002	d
549	47231	1050821477623210368	144.406188	60.213545	-11.880 ± 0.065	-32.046 ± 0.053	9.19 ± 0.13	112.655 ± 0.488		
	46170	1038770314786277248	141.234404	59.993030	-17.608 ± 0.054	-20.520 ± 0.055	-19.63 ± 0.28	103.250 ± 0.378	0.478 ± 0.003	d
550	47335	5247416705243609088	144.688027	-66.858881	-36.613 ± 0.052	45.089 ± 0.053		85.534 ± 0.230		
	47017	5249310751464090112	143.734891	-64.999265	-34.698 ± 0.058	43.970 ± 0.051	44.93 ± 14.31	87.442 ± 0.228	0.458 ± 0.002	
551	47399	813906786608830464	144.864275	42.285845	-6.119 ± 0.063	-6.587 ± 0.065	-3.36 ± 0.48	74.017 ± 0.272		
	47851	801608096216800000	146.304399	41.155079	-1.902 ± 0.089	-3.864 ± 0.100		370.751 ± 9.574	0.782 ± 0.019	c
557	51536	828983049535772928	157.894852	43.264808	-20.822 ± 0.059	15.860 ± 0.084		99.483 ± 0.437		
	51726	828895294768816000	158.531822	43.464793	-11.095 ± 0.080	8.714 ± 0.105	-11.98 ± 0.33	142.610 ± 1.172	0.028 ± 0.006	c
558	51608	5229614856076359168	158.134154	-72.428414	-56.798 ± 0.047	-45.861 ± 0.046	0.37 ± 0.20	70.927 ± 0.136		
	51611	5229612622693362048	158.145528	-72.441652	-56.698 ± 0.043	-46.489 ± 0.037	0.40 ± 0.54	70.918 ± 0.112	-1.771 ± 0.002	
582	57950	5343610331876174336	178.283059	-56.727293	-39.410 ± 0.058	-10.227 ± 0.052	13.36 ± 0.66	102.128 ± 0.460		
	59716	6075548419252906368	183.711072	-55.789916	-35.722 ± 0.050	-11.041 ± 0.042	14.22 ± 1.23	114.852 ± 0.518	0.776 ± 0.004	
588	58751	3575541998835891456	180.749457	-10.752474	33.041 ± 0.105	-18.763 ± 0.077	-12.39 ± 0.20	57.262 ± 0.183		
	58722	3575542995268304512	180.664538	-10.713711	33.067 ± 0.840	-20.664 ± 0.747	-16.16 ± 0.70	54.426 ± 1.115	-1.047 ± 0.010	d
589	58813	6147474037517738624	180.943487	-44.122728	98.970 ± 0.059	18.173 ± 0.039	6.41 ± 0.12	53.089 ± 0.131		
	58815	6147474071877478144	180.949433	-44.117898	101.361 ± 0.055	15.724 ± 0.036	6.14 ± 0.17	52.952 ± 0.126	-2.224 ± 0.010	b
592	59243	5788355123068307328	182.281096	-78.781346	-43.364 ± 0.062	-7.619 ± 0.060		99.808 ± 0.327		
	58490	5224879500011370496	179.925399	-76.023964	-41.025 ± 0.043	-6.190 ± 0.038	12.63 ± 1.40	99.746 ± 0.231	0.689 ± 0.002	
595	59865	6054216931644194304	184.157892	-63.197879	-145.407 ± 0.046	6.329 ± 0.041	-9.93 ± 0.16	68.919 ± 0.157		
	59913	6054219165008718848	184.342422	-63.226932	-145.829 ± 0.047	7.784 ± 0.045	-9.15 ± 0.19	69.046 ± 0.166	-0.974 ± 0.002	
596	59898	5860789299912353024	184.275888	-65.693002	-38.331 ± 0.083	-10.073 ± 0.077		105.943 ± 0.604		
	60183	5860587917472173056	185.117150	-65.842707	-41.434 ± 0.100	-11.322 ± 0.084		97.363 ± 0.587	-0.175 ± 0.005	
597	59960	6072902994276659200	184.471331	-55.975581	-39.014 ± 0.057	-12.872 ± 0.046		103.334 ± 0.458		
	59716	6075548419252906368	183.711072	-55.789916	-35.722 ± 0.050	-11.041 ± 0.042	14.22 ± 1.23	114.852 ± 0.518	-0.053 ± 0.004	
607	61135	3907637494456207360	187.913755	12.127870	-57.344 ± 0.128	3.719 ± 0.078		106.825 ± 0.700		
	61416	3931759748777206272	188.777443	12.938992	-57.292 ± 0.155	6.364 ± 0.073	17.46 ± 0.19	107.151 ± 0.850	0.339 ± 0.006	
610	61937	3927438771159865856	190.392833	10.426268	-106.518 ± 0.092	-0.193 ± 0.057		71.160 ± 0.247		
	62350	3927604694336986368	191.641939	11.378495	-112.544 ± 0.114	-0.472 ± 0.059	-17.49 ± 0.14	65.405 ± 0.297	0.267 ± 0.003	b
620	65466	1446271417351852544	201.277774	23.854387	-10.836 ± 0.220	-7.596 ± 0.194		90.650 ± 0.841		
	65508	1448260262087566848	201.413988	25.682150	-10.309 ± 0.088	-8.666 ± 0.071	-0.35 ± 0.66	86.755 ± 0.292	0.453 ± 0.006	

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
624	65779	5863709946382545280	202.275373	−66.073676	-127.902 ± 0.048	11.368 ± 0.056	-24.72 ± 0.29	78.909 ± 0.228		
	65785	5863709946382541952	202.289332	−66.078529	-127.318 ± 0.041	11.056 ± 0.050	-24.52 ± 0.35	78.838 ± 0.207	-1.989 ± 0.008	
626	65899	1442870284289795968	202.628390	22.512881	25.400 ± 0.076	-45.436 ± 0.034	-35.48 ± 0.18	83.756 ± 0.263		
	65884	1441682158897145600	202.579217	21.500051	22.957 ± 0.075	-49.366 ± 0.032	58.12 ± 0.30	87.091 ± 0.277	0.179 ± 0.003	d
630	66749	6293670601102816128	205.211181	−17.792721	-36.521 ± 0.086	-11.333 ± 0.079	-8.19 ± 0.46	90.540 ± 0.458		
	66717	6293764540627556224	205.135238	−17.343786	-45.844 ± 0.116	-13.594 ± 0.112	-1.02 ± 0.51	108.416 ± 1.021	-0.103 ± 0.006	c,d
633	67250	1496459690754708736	206.748323	38.542600	-134.290 ± 0.088	-22.464 ± 0.115	-11.20 ± 0.13	92.492 ± 0.788		
	67041	1496708798857641600	206.083788	38.797635	-141.262 ± 0.026	-23.293 ± 0.038	-32.94 ± 0.18	95.946 ± 0.296	-0.022 ± 0.005	d
635	67470	3728726646011331328	207.399613	13.010410	-147.396 ± 0.067	25.352 ± 0.059		56.281 ± 0.141		
	67673	3728039760481678592	207.961829	11.937313	-149.496 ± 0.077	25.658 ± 0.055	-2.80 ± 0.48	58.219 ± 0.162	0.081 ± 0.002	b
636	67639	6094716308525121408	207.884045	−48.293349	-114.076 ± 0.108	-27.236 ± 0.101	5.75 ± 0.18	68.484 ± 0.284		
	67645	6094716239805635072	207.893709	−48.298861	-113.740 ± 0.104	-26.793 ± 0.102	4.72 ± 0.22	68.085 ± 0.278	-1.996 ± 0.013	
642	68830	6291206045789315328	211.410852	−18.072550	39.425 ± 0.094	-45.424 ± 0.076	15.18 ± 12.84	88.382 ± 0.436		
	68833	6291205977069837696	211.412416	−18.081112	37.270 ± 0.094	-44.559 ± 0.081	28.05 ± 0.18	89.125 ± 0.420	-1.871 ± 0.008	d
655	71726	1282815063829295360	220.077109	30.443646	93.410 ± 0.064	-44.363 ± 0.086	-11.80 ± 0.15	54.983 ± 0.136		
	71737	1282817022334383232	220.118799	30.520323	93.470 ± 0.073	-43.678 ± 0.095	-11.49 ± 0.14	54.724 ± 0.156	-1.091 ± 0.002	
677	76046	4414349489701257984	232.953494	−2.066574	-79.827 ± 0.083	-30.371 ± 0.071	-9.52 ± 0.26	76.037 ± 0.302		
	75923	4416093315142832128	232.604610	−1.318934	-70.150 ± 0.072	-28.983 ± 0.060	-25.82 ± 1.27	67.463 ± 0.203	0.014 ± 0.003	d
678	76133	4416110082695309184	233.241330	−1.186582	-17.765 ± 0.214	-42.217 ± 0.205	-15.85 ± 0.15	82.944 ± 0.887		
	77728	4403070149671286656	238.052074	−2.278682	-15.408 ± 0.093	-43.981 ± 0.066	-3.50 ± 0.26	88.630 ± 0.468	0.868 ± 0.007	d
691	78283	1202709349617637632	239.757321	18.325889	-59.445 ± 0.065	2.520 ± 0.058	-61.82 ± 0.16	71.079 ± 0.306		
	78067	1204270110670555136	239.094563	20.418776	-56.658 ± 0.058	9.315 ± 0.061	-18.21 ± 0.71	80.184 ± 0.321	0.460 ± 0.004	d
704	80886	1299204074916904320	247.745828	23.985828	-30.683 ± 0.041	31.931 ± 0.050	-20.02 ± 0.23	74.958 ± 0.181		
	81875	1299508639637961344	250.861555	23.196612	-30.122 ± 0.032	30.284 ± 0.045	-40.40 ± 0.29	99.969 ± 0.249	0.655 ± 0.002	c,d
707	81641	4434301983614947072	250.161198	4.219745	0.353 ± 0.175	-10.476 ± 0.134		101.209 ± 1.084		
	81634	4434301841878055296	250.146462	4.207160	0.364 ± 0.124	-9.859 ± 0.095		99.832 ± 0.640	-1.469 ± 0.008	
713	84054	4571879578631697024	257.763126	24.237827	-11.782 ± 0.054	30.655 ± 0.056		80.848 ± 0.272		
	84070	4571879475552172544	257.820456	24.252545	-11.230 ± 0.037	29.770 ± 0.042		79.667 ± 0.190	-1.119 ± 0.003	
715	84515	4388409330344765056	259.153687	3.408540	-60.249 ± 0.072	19.568 ± 0.063	-14.44 ± 0.22	82.661 ± 0.311		
	85911	4485937214320449280	263.339536	5.700825	-54.948 ± 0.083	21.769 ± 0.071	-22.79 ± 0.29	73.460 ± 0.234	0.812 ± 0.003	d
726	85940	4487578544660527488	263.469996	8.103517	-16.092 ± 0.099	-59.011 ± 0.087	-28.07 ± 0.18	90.978 ± 0.397		
	85944	4487581018562340992	263.483482	8.165793	-13.134 ± 0.087	-60.275 ± 0.084		90.133 ± 0.337	-0.997 ± 0.004	b
737	88782	6719536193567989120	271.858999	−46.899274	-32.617 ± 0.086	-106.932 ± 0.081	-83.59 ± 0.12	71.053 ± 0.322		
	87887	5954345541675673728	269.293720	−46.122032	-43.037 ± 0.096	-102.548 ± 0.085	19.85 ± 0.25	84.984 ± 0.363	0.419 ± 0.004	c,d

(*Continued*)

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

Table 1. (*Continued*)

Index SO11	HIP2	GDR2	α (deg)	δ (deg)	μ_α (mas/yr)	μ_δ (mas/yr)	v_r (km/s)	d (pc)	$\log_{10}(\Delta R)$ (pc)	Exclusion test
740	89373	6721441784663730816	273.581281	−43.154515	-0.873 ± 0.104	-53.633 ± 0.091	-44.16 ± 0.33	103.306 ± 0.605		
	89274	6724728980838829952	273.257554	−42.288522	-5.729 ± 0.101	-51.286 ± 0.087		109.826 ± 0.798	0.223 ± 0.006	
743	90026	6649398690418063232	275.541876	−55.564195	77.717 ± 0.075	1.586 ± 0.076		96.083 ± 0.534		
	90028	6649398690418059392	275.542705	−55.572839	79.534 ± 0.073	1.748 ± 0.068	-5.14 ± 0.16	96.934 ± 0.538	-1.836 ± 0.013	
749	93029	2133995118527034496	284.270902	51.720942	43.638 ± 0.057	-5.617 ± 0.055	1.76 ± 0.46	84.236 ± 0.185		
	92467	2143913950359678464	282.666306	49.767527	45.000 ± 0.042	-1.773 ± 0.051	-12.52 ± 0.40	86.532 ± 0.173	0.516 ± 0.002	d
756	96979	4301163357576782464	295.691253	8.382994	23.989 ± 0.081	53.912 ± 0.053	-40.83 ± 0.17	60.953 ± 0.220		
	96976	4301163323217046912	295.684014	8.380594	23.964 ± 0.074	52.346 ± 0.050	-41.00 ± 0.16	60.950 ± 0.186	-2.095 ± 0.005	
759	97646	6447036152303430528	297.686877	−59.193721	23.300 ± 0.463	-12.433 ± 0.407		85.947 ± 2.503		
	97581	6447030139349235200	297.514014	−59.264087	24.031 ± 0.114	-15.899 ± 0.082		91.402 ± 0.617	-0.757 ± 0.015	
761	98174	6447100091479968256	299.276478	−58.901415	23.248 ± 0.230	-14.783 ± 0.246		90.149 ± 1.382		
	97646	6447036152303430528	297.686877	−59.193721	23.300 ± 0.463	-12.433 ± 0.407		85.947 ± 2.503	0.125 ± 0.019	
768	99689	1808691203160200576	303.437164	16.157968	-7.280 ± 1.319	5.631 ± 1.216		124.509 ± 12.288		
	100451	1808808571723073152	305.555561	16.372994	1.538 ± 0.067	0.497 ± 0.060		328.737 ± 4.829	0.908 ± 0.033	c
770	99729	4249652990144051840	303.540141	6.588725	-132.528 ± 0.101	-58.445 ± 0.064	-0.18 ± 0.20	63.078 ± 0.208		
	99727	4249652783985617920	303.537683	6.576958	-129.729 ± 0.096	-59.388 ± 0.065	-0.21 ± 0.19	63.093 ± 0.203	-1.878 ± 0.004	
776	100941	6679307846231740032	306.999982	−42.620131	94.662 ± 0.082	-122.858 ± 0.057		104.908 ± 0.685		
	100937	6679308018030433536	306.986590	−42.620666	93.796 ± 0.078	-122.511 ± 0.055	-62.19 ± 0.23	105.016 ± 0.629	-1.743 ± 0.009	
777	101082	2298101352139398144	307.366686	81.092228	66.243 ± 0.082	221.381 ± 0.105	-14.38 ± 0.17	64.364 ± 0.211		
	101166	2298101901895214720	307.593111	81.140436	66.494 ± 0.058	221.043 ± 0.070	-14.24 ± 0.27	64.049 ± 0.124	-1.176 ± 0.002	
780	101719	2195226749280378368	309.283271	61.364403	23.834 ± 0.051	-42.621 ± 0.048	3.21 ± 0.18	57.493 ± 0.082		
	102727	2194321816851242624	312.239000	61.118583	19.428 ± 0.053	-40.421 ± 0.050	-9.36 ± 0.18	65.332 ± 0.122	0.189 ± 0.001	d
782	102725	6376446646806738816	312.236006	−68.791520	42.026 ± 0.043	-61.530 ± 0.069		85.988 ± 0.270		
	103917	6375793502540188800	315.826134	−69.171496	44.104 ± 0.053	-59.448 ± 0.055	-10.04 ± 0.17	87.808 ± 0.446	0.309 ± 0.004	
784	103107	6481251098731588224	313.358335	−49.383030	43.599 ± 0.064	-30.438 ± 0.051	-16.94 ± 0.28	89.053 ± 0.300		
	103139	6481246906845850880	313.465930	−49.449714	43.875 ± 0.051	-27.428 ± 0.044	-17.98 ± 0.43	89.993 ± 0.292	-0.821 ± 0.003	
793	104536	1839746393680655232	317.629011	22.457052	22.239 ± 0.137	-11.888 ± 0.138		116.759 ± 1.188		
	102981	1838905954482116480	312.957870	21.868618	20.705 ± 0.081	-11.991 ± 0.072	-11.55 ± 0.18	108.378 ± 0.582	0.933 ± 0.007	
802	109306	6611824083124944384	332.177751	−33.125589	13.261 ± 0.078	24.447 ± 0.081		78.654 ± 0.344		
	110433	6599619950733282304	335.519158	−34.488798	11.670 ± 0.060	25.950 ± 0.066		86.438 ± 0.281	0.649 ± 0.003	
815	112537	2396293134977302272	341.906431	−23.172364	24.576 ± 0.071	-10.583 ± 0.065	-3.25 ± 0.37	78.726 ± 0.286		
	111596	6628071944405827712	339.129743	−21.584986	31.319 ± 0.072	-4.837 ± 0.062	11.06 ± 1.60	106.288 ± 0.444	0.688 ± 0.003	c,d
839	117454	2337899270721594752	357.237150	−25.144889	-13.177 ± 0.093	-42.966 ± 0.111	-3.30 ± 0.83	85.714 ± 0.686		
	117720	2338428513772452480	358.123916	−24.165778	-15.355 ± 0.095	-39.481 ± 0.069	44.28 ± 0.67	113.458 ± 0.771	0.343 ± 0.006	c,d

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

from both *Hipparcos* and Gaia for the primaries and companions of all the binaries used together with the results of the exclusion criteria described.

3. Gaia Wide Binary Projected Kinematic Results

In Ref. 9, we calculated the projected separation in the plane of the sky using only the parallax to the primary of each binary, but given the higher quality Gaia DR2 data, we now compute the projected separation between the components of each binary using explicitly the observed Gaia positions and parallaxes to each component of the binary. The average parallax to both components is used to gauge the distance to each pair. Using reported Gaia proper motions, the relative velocity difference in one dimension is calculated for each binary twice, once considering only right ascension proper motions, and once considering only declination proper motions. In all cases, the relative physical motion is calculated including full spherical geometric effects (e.g. Ref. 19), and not under the more standard small angle approximation. This requires the radial velocity of at least one component, which we have for 71 of our 81 final pairs. For the remaining 10, a $V_r = 0$ was assumed for the effects of the above correction (e.g. SO11). The effects of the above refinement are only relevant for the nearest and widest of pairs, in our sample, only a few individual systems, as can be readily checked from the data used and shown in Table 1.

Figure 4 gives two Δv_{1D} measurements for each binary pair in the final sample with the corresponding 1σ error bars. A clear flat upper envelope is evident. In Fig. 5, we show the rms value for the one-dimensional velocity differences described

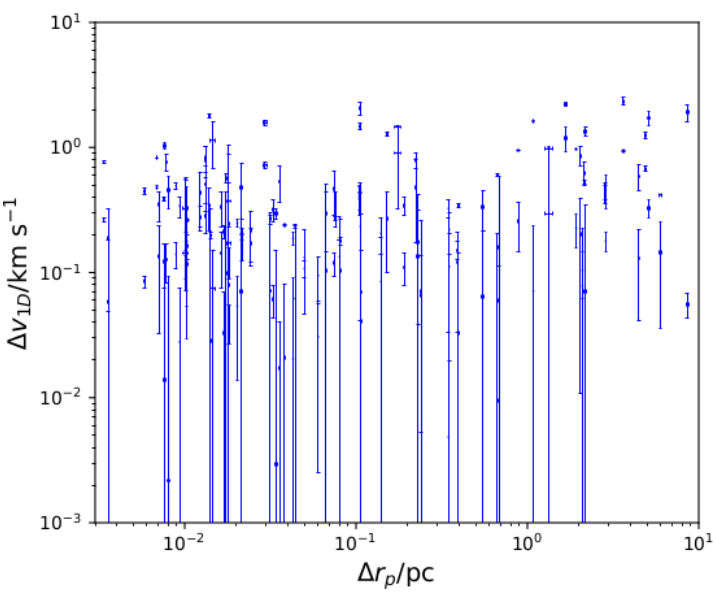

Fig. 4. One-dimensional relative velocities for the final binary sample, showing both results from using only right ascension data and from using only declination values with corresponding error bars.

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

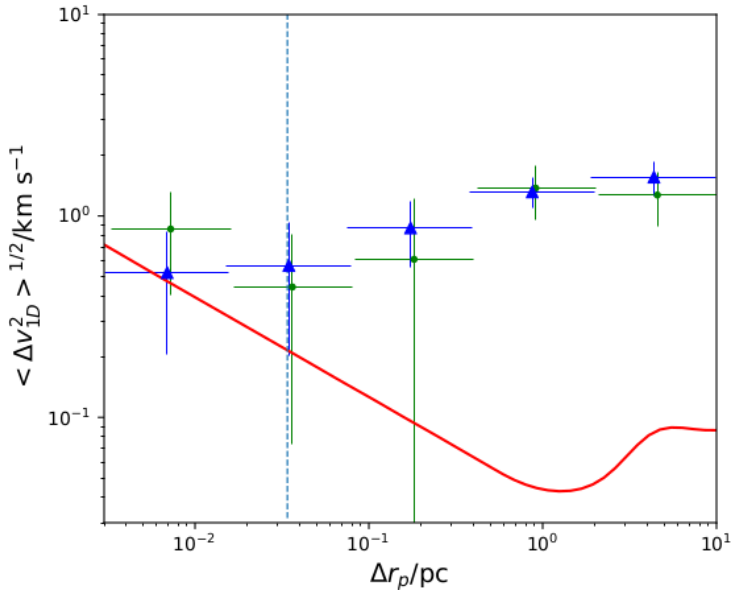

Fig. 5. The solid curve shows the rms value for the one-dimensional relative velocity between the components of a present day Solar Neighborhood binary as a function of the projected separation for the Newtonian prediction of Ref. 11. The same quantity for the SO11 wide binary catalog stars, this time using Gaia DR2 data, is shown by the points with error bars, circles for right ascension data and triangles for declination. A small artificial horizontal offset was introduced on both data sets to avoid having overlapping error bars. The inconsistency of the observed data with the Newtonian prediction is obvious for separations greater than 7000 AU at which accelerations are expected to drop below a_0. This threshold is indicated by the dashed vertical line.

above, plotted against the projected separations in a binned logarithmic scale, circles and triangles for right ascension and declination data, respectively. The horizontal error bars give the bin sizes, while the vertical ones show the contribution of Gaia reported errors and error propagation, to which a Poisson contribution has been added, and which given the small numbers of binaries in each bin (21, 23, 17, 8 and 12, from left to right), actually dominates the error budget in most cases. The dashed vertical line appears at 7000 AU, the approximate scale where acceleration is expected to drop below a_0.

Also shown in Fig. 5 are the Newtonian predictions for this same quantity from Ref. 11, where large collections of 50,000 simulated binaries are modeled for a range of plausible distributions of ellipticities, and followed dynamically under Newtonian expectations within the local Galactic tidal field. These are also subject to the effects of field star and field stellar remnant bombardment for a 10 Gyr period. Finally, the resulting bound and unbound stellar pairs are projected along a fiducial line of sight to yield a robust prediction for the expected $\langle \Delta v^2_{1D} \rangle^{1/2}$ as a function of Δr, solid curve. These results are easy to understand; a $\Delta v \propto \Delta r^{-1/2}$ trend is apparent, down to the tidal radius of the problem which appears at 1.7 pc. Beyond this point, ionized binaries continue to move along practically common Galactic orbits with relative velocities which show a mild enhancement which then levels off close to $0.1\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

It is clear that to the left of the a_0 dashed line, our results are consistent within confidence intervals with the Newtonian expectations. However, going to separations larger than 7000 AU, the observed points stop following the expected trend and actually level off at a Δv amplitude close to the values seen at the a_0 point, reproducing qualitatively the phenomenology seen in galactic rotation curves.

This result for the binary sample presented is extremely challenging to a Newtonian point of view where the relative velocities are expected to be much lower than observed. Given the construction of the SO11 sample, binaries with small velocity differences would appear as stronger local overdensities in phase-space, and hence, selection criteria, if anything, are biased against binaries with large velocity differences, not small ones. Thus, from a Newtonian point of view, bound binaries with separations smaller than the tidal radius of 1.7 pc and larger than 7000 AU are unexpectedly missing. Also, as already mentioned in Ref. 20, a population of nonchance-associated binaries appears at scales above 7000 AU having relative velocities over an order of magnitude above bound expectations with relative velocities of $\sim 1\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ and separations of a few pc; the dynamical ages of unbound systems are of only a few 10^6 years. What sustains and replenishes these populations under a Newtonian framework? At separations below the 1.7 pc tidal radius of the problem, bound binaries should appear under a Newtonian framework.

Furthermore, the results shown in Fig. 5 confirm what was presented in Ref. 9 though the much coarser *Hipparcos* data of that first study yielded significantly larger error bars. That those first results might have been the result of missed biases or simply the error structure of the *Hipparcos* data now appears very unlikely, as we see two consistent results coming from the data obtained by two completely independent satellites. Indeed, the error bars have significantly shrunk with central results changing little. Note also that the two Δv_{1D} estimates we obtain, using only right ascension or only declination data, are consistent with each other.

A potential caveat on the interpretation presented comes from the possible presence of a population of misidentified binaries being actually parts of loose, dissolving moving groups. Reference 20 had recently showed that although isolated wide binaries dominate, a search algorithm of the type used in SO11 could also pick up a fraction of misidentified binaries being part of larger moving groups, many of the smallest of which probably remain undiscovered. A full answer and validation or otherwise of our results necessarily awaits a much more extensive study through the full Gaia catalog and a more complete exploration and understanding of the phase-space structure and overdensities of the Solar Neighborhood and local Milky Way disk environment.

Although the gravitational anomaly detected appears on crossing the a_0 threshold of MOND, in MOND as such, the results are equally unexpected as the external field effect of MOND (or AQUAL e.g. Ref. 8) should dominate. Given that the orbital acceleration of the solar neighborhood is higher than the internal acceleration of the binaries in question, in MOND as such, only a very modest enhancement

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

of the effective value of G would be expected (e.g. Ref. 13). Thus, within a MONDian frame, our results do not imply the validity of the most well-studied version, but rather of a variant where the external field effect does not appear, or is much suppressed e.g. as in Ref. 21. In terms of covariant extensions to GR having a MONDian low velocity limit, it is hard to know to what extent an external field effect might be present in many of the recently developed options (e.g. the $f(R)$ variants reviewed in Ref. 22, the emergent gravity of Ref. 23 or the $F(R, L)$ proposal of Ref. 24). Our results then serve as constraints in terms of requiring a minimal external field effect, at least for the sub-parsec scales in the solar neighborhood explored.

4. Final Remarks

We have presented a sample of 81 wide binaries which were very carefully selected against chance associations or projection effects through the cross-correlation of the *Hipparcos*, Tycho-2 and the *Tycho* double star catalogs, amongst others, with the detailed five-dimensional phase-space structure of the solar neighborhood by SO11. By taking advantage of the cross-identification of the *Hipparcos* catalog and the Gaia DR2 data, we updated the parallax and proper motion observations of SO11 to use exclusively Gaia DR2 astrometry.

These binaries were then compared to Newtonian predictions for the expected one-dimensional rms relative velocity between the components of each binary and their projected separations, including modeling orientation effects, a number of plausible distributions of ellipticities and, crucially, the effects of Galactic tides and stellar and stellar remnant perturbers over a 10-Gyr period by Jiang and Tremaine.[11]

For separations below 7000 AU, where accelerations are expected to be above the $a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ of MOND, we find the data to be consistent with the Newtonian predictions. For projected separations above 7000 AU, however, the data are inconsistent with Newtonian predictions. This challenges the validity of Newtonian dynamics at the low acceleration regime, and shows the existence of gravitational anomalies of the type generally attributed to the presence of a hypothetical and dominant dark matter component, this time down to the relatively tiny sub-parsec stellar scales.

Acknowledgments

The authors thank an anonymous referee for a careful reading of the first version of this paper and constructive criticism leading to a more complete and clearer final version. XH and RAMC acknowledge the support of DGAPA-UNAM PAPIIT IN-104517 and CONACyT.

References

1. S. E. Koposov *et al.*, *Astrophys. J.* **811** (2015) 62.

Int. J. Mod. Phys. D 2019.28. Downloaded from www.worldscientific.com
by NATIONAL AUTONOMOUS UNIVERSITY OF MEXICO (UNAM) on 12/15/23. Re-use and distribution is strictly not permitted, except for Open Access articles.

2. P. Salucci, M. I. Wilkinson, M. G. Walker, G. F. Gilmore, E. K. Grebel, A. Koch, M. C. Frigerio and R. F. G. Wyse, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420** (2012) 2034.
3. F. Lelli, S. S. McGaugh and J. M. Schombert, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468** (2017) L68.
4. R. Durazo, X. Hernandez, B. Cervantes Sodi and S. F. Sanchez, *Astrophys. J.* **863** (2018) 107.
5. R. Scarpa, G. Marconi and R. Gilmozzi, *Astron. Astrophys.* **405** (2003) L15.
6. R. Scarpa, G. Marconi, G. Carraro, R. Falomo and S. Villanova, *Astron. Astrophys.* **525** (2011) A148.
7. M. Milgrom, *Astrophys. J.* **287** (1984) 571.
8. R. H. Sanders and S. S. McGaugh, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** (2002) 263.
9. X. Hernandez, M. A. Jimenez and C. Allen, *Eur. Phys. J. C* **72** (2012) 1884.
10. E. J. Shaya and R. P. Olling, *Astrophys. J. Suppl.* **192** (2011) 2.
11. Y.-F. Jiang and S. Tremaine, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** (2010) 977.
12. R. Scarpa, R. Ottolina, R. Falomo and A. Treves, *Int. J. Mod. Phys.* **26** (2017) 1750067.
13. C. Pittordis and W. Sutherland, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **480** (2018) 1778.
14. I. Banik and H. Zhao, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **480** (2018) 2660.
15. P. M. Marrese, S. Marinoni, M. Fabrizio and G. Altavilla, arXiv:180809151.
16. Gaia Collab., *Astron. Astrophys.* **616** (2018) 1.
17. E. Høg *et al.*, *Astron. Astrophys.* **357** (2000) 367.
18. C. Fabricius, E. Høg, V. V. Makarov, B. D. Mason, G. L. Wycoff and S. E. Urban, *Astron. Astrophys.* **384** (2002) 180.
19. W. M. Smart, *Stellar Kinematics* (Longmans, London, 1968).
20. S. Oh, A. M. Price-Whelan, D. W. Hogg, T. D. Morton and D. N. Spergel, *Astron. J.* **153** (2017) 257.
21. M. Milgrom, **42** (2011) 2175.
22. S. Capozziello and M. De Laurentis, **509** (2011) 167.
23. E. Verlinde, *SciPostPhys* **2** (2017) 016.
24. E. Barrientos and S. Mendoza, *Phys. Rev. D* **98** (2018) 084033.

Apéndice B

Internal kinematics of *Gaia* eDR3 wide binaries

Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **509,** 2304–2317 (2022)
Advance Access publication 2021 October 27

https://doi.org/10.1093/mnras/stab3038

Internal kinematics of *Gaia* eDR3 wide binaries

X. Hernandez,[1★] S. Cookson[2] and R. A. M. Cortés[1]

[1]*Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70–264 C.P., 04510 México D.F. México*
[2]*Crawley Astronomical Society, c/o Copthorne Prep Sch, Effingham Ln, Copthorne, Crawley RH10 3HR, UK*

Accepted 2021 October 15. Received 2021 October 12; in original form 2021 July 30

ABSTRACT

Using the recent *Gaia* eDR3 catalogue, we construct a sample of solar neighbourhood isolated wide binaries satisfying a series of strict signal-to-noise data cuts, exclusion of random association criteria, and detailed colour–magnitude diagram selections to minimize the presence of any kinematic contaminating effects having been discussed in the literature to date. Our final high-purity sample consists of 423 binary pairs within 130 pc of the sun and in all cases high-quality *Gaia* single-stellar fits for both components of each binary (final average RUWE values of 0.99), both also restricted to the cleanest region of the main sequence. We find kinematics fully consistent with Newtonian expectations for separations, s, below 0.009 pc, with relative velocities scaling with $\Delta V \propto s^{-1/2}$ and a total binary mass, $M_{\rm b}$, velocity scaling consistent with $\Delta V \propto M_{\rm b}^{1/2}$. For the separation region of $s > 0.009$ pc, we obtain significantly different results, with a separation independent $\Delta V \approx 0.5\,{\rm km\,s^{-1}}$ and a $\Delta V \propto M_{\rm b}^{0.24\pm0.21}$. This situation is reminiscent of the low acceleration galactic baryonic Tully–Fisher phenomenology, and indeed, the change from the two regimes we find closely corresponds to the $a \lesssim a_0$ transition. These results are at odds not only with Newtonian expectations, but also with MOND predictions, where the presence of an external field effect implies only small deviations from Newtonian dynamics are expected for solar neighbourhood wide binaries.

Key words: gravitation – binaries: general – stars: kinematics and dynamics.

1 INTRODUCTION

The most salient features of the gravitational anomalies generally ascribed to the presence of a dominant dark matter component at galactic scales, are the loss of a dependence on radius for equilibrium velocities, the clear scaling of these equilibrium velocities with the fourth root of the total baryonic mass of the systems in question, and the occurrence of the transition from a regime where the observed matter alone adequately explains kinematic observations through Newtonian gravity, to the aforementioned anomalous region, always at acceleration scales of $a = a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10}\,{\rm m\,s^{-2}}$.

The first two of the above properties are of course the well-known flatness and baryonic Tully–Fisher relation of late-type galactic rotation curves, which can be summarized as $V_{\rm TF} = 0.35(M/M_\odot)^{1/4}$ ${\rm km\,s^{-1}}$ (McGaugh et al. 2000), and which have been recently extended to the asymptotically flat velocity dispersion profiles of a variety of pressure supported systems such as globular clusters (e.g. Scarpa et al. 2003, Hernandez et al. 2012b, Hernandez & Lara-D I 2020) and elliptical galaxies (e.g. Jimenez et al. 2013; Durazo et al. 2018; Chae et al. 2020a), also showing a scaling with the fourth root of the total baryonic mass.

The last of the three traits described above forms the basis of MOND (Milgrom 1983) as an alternative to the standard dark matter postulate, where an underlying transition in the structure of physics is proposed as the causal mechanism behind the gravitational anomalies that occur in the low acceleration regime at galactic scales, and forms also the central tenant of a large range of modified gravity theories inspired by MOND, aiming at an explanation in the absence of the dark matter hypothesis. Examples of these last are Bekenstein (2004), Moffat & Toth (2008), Zhao & Famaey (2010), Capozziello & De Laurentis (2011), Verlinde (2016), Barrientos & Mendoza (2018), McCulloch et al. (2019), and Hernandez et al. (2019b).

Within the context described above, one of us in Hernandez et al. (2012a) identified wide binaries as an interesting test case to explore the generality (or lack thereof) of the gravitational anomalies detected at galactic scales, to an entirely different astronomical range of scales and masses, which, however, shares the same low acceleration regime. Wide binaries composed of two 1 $M_\odot$ mass stars will cross the $a < a_0$ threshold when the separation between both components, s, becomes larger than about 7000 au, 0.035 pc, Hernandez et al. (2012a). That initial exploration of the problem was performed using the best astrometry available at the time, that from the *Hipparcos* satellite. The results were for 1D relative velocities on the plane of the sky for a small carefully selected sample of 280 wide binaries, showing values much larger than Newtonian expectations, and, to within the large confidence intervals of that study, consistent with no dependence on the separation on the plane of the sky of the two components of the binaries studied, for separations well within the tidal radius of the problem, of about 0.7 pc (e.g. Jiang & Tremaine 2010).

Since, the interest on the proposed test has grown and a number of independent investigations have been performed, confirming the presence of the signal first detected in Hernandez et al. (2012a). Scarpa et al. (2017) performed detailed ground based follow-up observations of a small sub-sample of the stars analysed in Hernandez et al. (2012a), obtaining accurate spectroscopic line of sight velocities, and confirming the presence of relative 3D velocities in excess of Newtonian expectations. Pittordis &Sutherland (2018),

★ E-mail: xavier@astro.unam.mx

© 2021 The Author(s)
Published by Oxford University Press on behalf of Royal Astronomical Society

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

Banik & Zhao (2018), and Banik & Kroupa (2019) refined the original test and conclude that distinguishing between Newtonian and modified gravity models will be possible using final *Gaia* data, once the full mission accuracy becomes available. Using *Gaia* DR2 data, Pittordis & Sutherland (2019) show that some MOND variants appear disfavoured by their analysis of wide binaries, while the uncertainties inherent to the data used were unable to unequivocally discern between a purely Newtonian scenario and some MOND variants. More recently, in Hernandez et al. (2019a) two of us revisited the wide binary sample of the original experiment, but using the much superior *Gaia* DR2 astrometry, and obtaining results consistent with the original, in spite of substantially reduced confidence intervals on the relative velocities.

For relatively bright unresolved stellar companions, the position of the observed star in the HR diagram will shift to brighter magnitudes as per standard spectroscopic binaries, while for sufficiently dim undetected companions (essentially stellar dark matter), the wobble induced on the affected component of the observed binary, a kinematic contamination inflating the detected binary kinematics, will become apparent through the quality of the fit of the single star solution. In more detail, Belokurov et al. (2020) show that unresolved stellar companions in the *Gaia* DR2 catalogue result in poor single stellar fits (RUWE values larger than 1.4, extending to 10 or sometimes even larger, the renormalized unit weight error parameter of *Gaia*), and identify regions of the solar neighbourhood *Gaia* HR diagram where unresolved stellar companions are prominent, and regions where such companions are largely absent.

In this paper, we use the recent *Gaia* eDR3 (*Gaia* Collaboration 2016, 2020, 2021; Lindegren et al. 2021) catalogue to construct a large sample of 5844 nearby, locally isolated wide binaries having high quality radial velocities, parallaxes, colours, magnitudes and proper motions, to construct a detailed picture of their relative velocity on the plane of the sky, ΔV. This, as a function of both 2D projected separation and total binary mass, $M_{\rm b}$, the latter as a diagnostic tool to help derive physical insight into the trends observed in velocity as a function of binary separation, with stellar mass inferred from main sequence accurate estimates through the absolute G magnitude from Pittordis & Sutherland (2019).

The initial sample is then carefully pruned to minimize all sources of kinematic contamination discussed to date, a strict RUWE parameter upper limit designed to exclude short period blended tertiaries, relative radial velocity cuts to exclude contamination of unbound stars from the mean field local distribution, and a detailed HR diagram region selection to further exclude the presence of unresolved stellar companions, restricted to the cleanest section of the main sequence, always for both components of each nearby binary. Results are consistent with Newtonian expectations in both separation and mass relative velocity scalings for the low separations corresponding to a high acceleration regime, but reminiscent of Tully–Fisher scalings for the low acceleration regime of wide binary separations.

In Section 2, we present our initial sample selection describing the removal of binaries in clustered environments to produce a catalogue of relatively isolated binaries, the use of a relative velocity along the line-of-sight threshold to exclude chance associations of unbound systems, and the introduction of signal-to-noise quality cuts on the original *Gaia* eDR3 parameters. Section 3 describes the cleaning of the sample by gradually introducing further distance cuts to minimize the probability ofkeeping binaries with long period unseen companions, the use of a RUWE quality cut to exclude unresolved tertiaries, and the implementation of a strict HR diagram selection criteria to isolate only binaries were both components are main-sequence stars with minimal probabilities of including blended tertiaries. In Section 4, we compare our results to those of some similarrecent studies. Finally, Section 5 presents our concluding remarks.

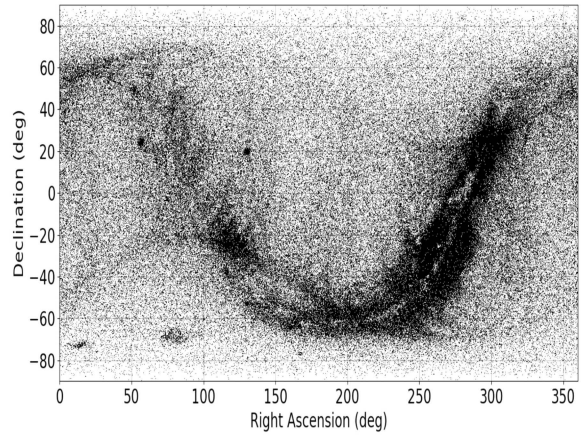

Figure 1. Full sky plot displaying over 800 000 binary pairs from the *Gaia* eDR3 catalogue satisfying our initial search criteria for binary star candidates within 200 pc of the Sun, see text. The presence of nearby groups and associations, as well as heavily crowded fields along the disc of the Milky Way are evident.

2 INITIAL SAMPLE SELECTION

We begin by using the *Gaia* initial search of El-Badry & Rix (2018) who construct a catalogue of wide binaries within 200 pc of the sun, which is then tested through various simulations to account for projection effects, a reasonable distribution of ellipticities and completion due to undetected companions, with a level of contamination estimated by those authors as < 0.2 per cent. An extension of the basic strategy presented in that paper was also used in Tian et al. (2020) to construct a catalogue of over 800 000 wide binaries within 4 kpc of the sun, maintaining a high purity for the sample.

Our initial *Gaia* search returns all stars within 200 pc of the sun having precise parallaxes (signal to noise > 20). The query then scans a projected circle of 0.5 pc about each of these stars for potential companions also required to have fairly precise parallax measurements (signal to noise > 5). Each potential binary pair is then rejected if the parallaxes of the two stars result in a distance difference along the line of sight for the two components larger than twice the projected separation, s, between them, at more than 3σ, i.e. a potential binary pair must satisfy $\Delta d - 2s < 3\sigma_{\Delta d}$. In going to large distances, a growing fraction of close companions will not be detected due to the fixed *Gaia* resolution, our sample is not complete in any volume-limited sense, the requirement is not than we should not miss any valid candidates, but that we should not include invalid ones. This initial search returns close to one million potential binary pairs shown on a sky plot in Fig. 1.

It is clear that a number of well-known local groupings and associations have remained, where wide binaries will not satisfy any strict isolation criterion. Also, crowded regions following the disc of the Milky Way are evident. Next, we demand that if any particular star appears as either the primary or the secondary of more than one potential binary pair, all such potential binary pairs are removed. This results in an isolation sphere of at least 0.5 pc about all of the potential binary pairs passing this criterion, and allows to minimize the effects of possible dynamic perturbations due to other nearby single stars forming part of the average stellar

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

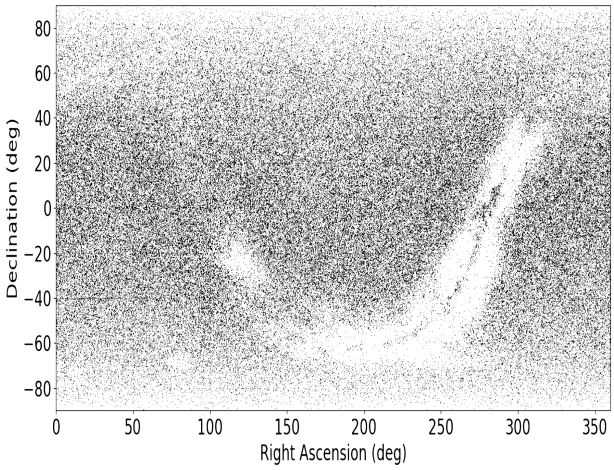

Figure 2. Full sky plot of 169 540 isolated wide binary pair candidates remaining after the removal of all candidate pairs were either the primary or the secondary star had been originally selected as either a primary or a secondary member of more than one binary pair candidate. The remaining binary pairs have no *Gaia* sources with parallax signal to noise determinations >5 within a 3D sphere of 0.5 pc. The removal of all local groups, as well as large areas of crowded fields along the Milky Way disc projection is apparent.

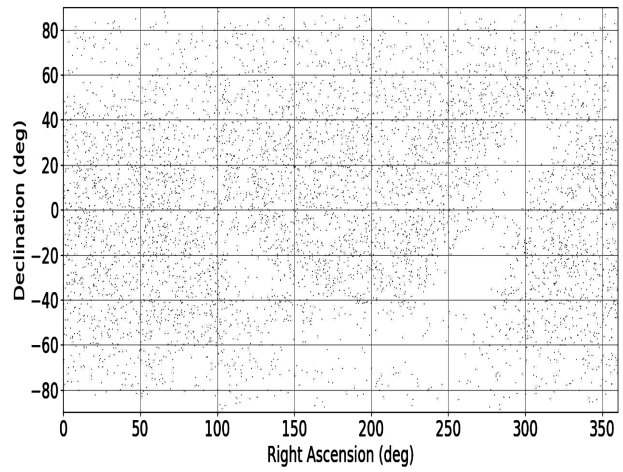

Figure 3. Full sky plot of all 5844 binary pairs in Fig. 2 having radial velocity measurements for both primaries and secondaries.

field population. In limiting ourselves to kinematic observations of binaries with projected separations below 0.1 pc, we select stars having no other close neighbours with parallax measurements within at least five times the binary separation; this isolation factor grows linearly in going to closer binaries.

After removing all binaries where either of the two stars forms part of more than one such pair we are left with 169 540 binary pair candidates, shown in a full sky plot in Fig. 2. We can see that the strict cuts applied have removed all evident local groupings, as well as excised the crowded zones along most of the Milky Way disc region.

Before examining the relative velocity distribution of the binary candidates, we will use the relative radial velocities of the two components to minimize the presence of unbound pairs by requiring the difference in radial velocities between both components of each binary to be below 4 km s^{-1}. Thus, we remove from consideration all binary pairs where either component is lacking a radial velocity determination. Also, as pointed out in El-Badry (2019), ignoring detailed spherical geometry correction effects will lead to spuriously inflated (and raising with s) relative velocities for near and wide binaries. Although this correction is only a minor contribution, keeping only stars with radial velocity observations allows the inclusion of full spherical geometry corrections (e.g. Smart 1968) to adequately estimate the true relative velocity of the binaries in our sample. Excluding grouped binaries and those where either component is missing a radial velocity measurement effectively remove over 99 per cent of the potential binary candidates. Fig. 3 shows the full sky plot of the 5844 binary pairs remaining, a very significant reduction from the candidate sample of Fig. 2.

We do introduce two modifications to the El-Badry & Rix (2018) query, the first a slight increase in the radius of the projected circle defining the initial search, from the 5×10^4 au = 0.25 pc used by those authors to the 0.5 pc considered here, so as to allow us to explore a somewhat larger range of binary separations. Finally, El-Badry & Rix (2018) introduce a cut in relative velocities on the plane of the sky to exclude any potential binary candidates that are inconsistent with Newtonian dynamics for a 5 $M_\odot$ total mass binary to 3σ. As our aim is to explore precisely the presence of wide binaries showing relative velocities above Newtonian values, we remove this last cut.

Then, we apply strict signal-to-noise (>40) quality cuts to the proper motion measurements in both RA and Dec. for both of the components of each potential binary, in looking for a small sample where all stellar properties used are highly accurate. Only potential binary pairs were both components pass the above data quality cuts in both of their proper motion measurements are retained. In order to minimize the presence of chance associations resulting from random pairs of stars drawn from the local field population, we introduce the cut mentioned previously requiring that the radial velocity difference between the two components of all potential binary pairs must be of less than 4 km s^{-1}, these last cuts leave us with 2868 binary pairs. This relative velocity limit takes the place of the Newtonian consistency criterion in the original query, and ensures that our ΔV inferences will be minimally affected by random fleeting encounters of field stars, which would have velocities each drawn from a Gaussian distribution having a velocity σ of around 40 km s^{-1}, and hence a pairwise velocity difference having also a Gaussian distribution with $\sigma = \sqrt{2} \times 40$ km s^{-1} $\approx$60 km s^{-1}.

Fig. 4 a gives the colour–magnitude diagram for this initial sample, dark black points for the 5736 stars from 2868 binaries remaining, with the 169 540 stars from the de-grouped binary pairs, but having no radial velocity measurements shown as the faint grey points. As in all subsequent colour–magnitude diagrams, each binary pair contributes two points, by construction, of the same shade. It is clear that the stars having no radial velocity measurements, are systematically dimmer than the brighter ones where the *Gaia* eDR3 catalogue returns also radial velocities. The former include the dimmer solar neighbourhood main sequence, white dwarfs to the lower left-hand region of the plot, and even a region of white dwarf/main sequence unresolved blended binaries as a diffuse cloud between the main sequence and the white dwarf population.

The main sequence for the selected stars is obvious, as is a band of narrow photometric binaries just above the clear main sequence composed primarily, but not exclusively, of the grey points. Indeed, most photometric binaries do not have radial velocity measurements in *Gaia* as the single star solution fails, providing an extra criterion for excluding such blended cases. As we infer relative velocities on the plane of the sky through proper motion observations over the duration of the *Gaia* eDR3 catalogue, rather than through instantaneous

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

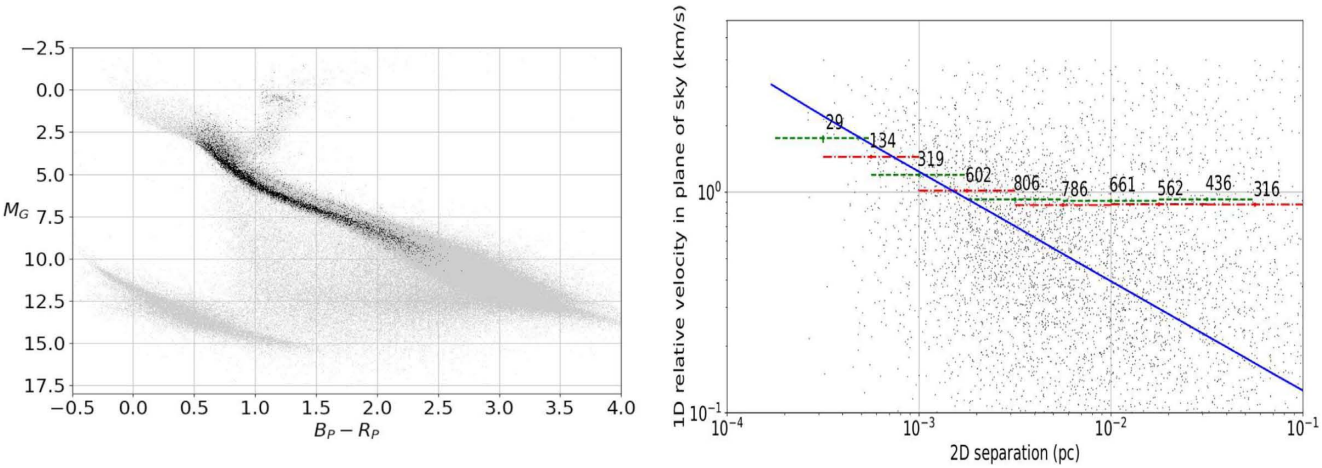

Figure 4. Left(a):Colour–magnitude diagram for all the 5736 stars of the 2868 binary pairs shown in Fig. 3, also having relative radial velocities between both components $<4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ and signal-to-noise ratio in proper motions for both RA and Dec. for both components >40, black dots, with the light grey dots showing the 169 540 stars of Fig. 2. The exclusion of white dwarfs, white dwarf/main sequence blends, and the noisier low brightness main sequence is clear. Right(b): Root mean square binned distribution of 1D relative velocities between the members of the 2474 binary pairs shown in the left-hand panel of this figure, which also satisfy having relative velocities in both RA and Dec. $< 4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, and a minimum signal to noise in both of these quantities >0.3, as a function of 2D projected separations between the members of each binary pair, for RA and Dec. measurements, dashed and dotted lines, respectively, with average relative errors for these two quantities being 10.77 and 11.85, respectively. Each binary pair also appears as a pair of points at a fixed separation, for its corresponding relative velocities in RA and Dec. The solid line gives the Newtonian predictions of Jiang & Tremaine (2010) for this same quantity.

Doppler shift inferences, we are not overly sensitive to either accelerations or velocities induced by hidden tertiaries, only to resulting displacements, which to a varying degree, will be averaged out over the orbit of the hidden tertiaries. Very tight hidden tertiaries with orbital periods much shorter than the 34 month eDR3 *Gaia* mission, lead to high instantaneous velocities, but to very low displacements, which hence imply negligible kinematic contamination through our proper motion relative velocity determinations. Of course, for hidden tertiaries of larger separations, a contamination effect inflating the wide binary relative velocity inference appears, the following section is dedicated to as careful a strategy to minimize hidden tertiaries in our final sample as the current data allow.

We end this section with a kinematic plot for the initial sample in Fig. 4(b), an rms binned distribution of 1D relative velocities as a function of 2D projected binary separation, dashed bins for RA measurements, and dotted for Dec. ones. Further removal of binaries with final relative velocity signal-to-noise values <0.3 or $\Delta V > 4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ on either RA or Dec. leaves us with 2474 binary pairs having mean signal-to-noise values for RA and Dec. proper motions of 3314 and 3285, and mean signal to noise for parallax measurements of 683. These last two cuts will be also implemented in all of the following kinematic distributions. The mean distance to the Sun for these stars is of 107 pc, and the mean RUWE parameter 1.34. The last low signal-to-noise lower limit on inferred velocities mentioned only excludes a few noisy outliers, the mean signal-to-noise values for this sample are of 10.77 and 11.85 for RA and Dec. velocity inferences, respectively.

As we have ended the sample considered at separations of 0.1 pc, and given the exclusion sphere introduced in the sample selection of 0.5 pc, our binaries included having the largest separations are isolated from any other *Gaia* eDR3 source having parallax measurements out to five times the binary separation. This isolation factor grows to 50 times the binary separation for separations of 0.01 pc, and continues growing linearly towards the smaller separations considered.

The solid line gives the results of Jiang & Tremaine (2010) for the rms 1D relative velocities for a simulated population of 50 000 binary pairs composed each of two one solar mass stars, and for a random distribution of line-of-sight projections and a reasonable distribution of ellipticities, after 10 Gyr of evolution in the solar neighbourhood under the influence of random encounters with field stars and the influence of the galactic tidal fields, assuming Newtonian gravity. This line closely follows a Keplerian scaling of $\Delta V_{\mathrm{RMS}} \propto s^{-1/2}$ out to the tidal radius of the problem, at close to 0.7 pc, lying beyond the region being explored here. Indeed, we end the figure at a separation of 0.1 pc, which implies that for all the binaries included, both components are at least five times closer than any other *Gaia* eDR3 source from the initial selection. Dim sources having poor parallax measurements can exist within the 0.5 pc projected circle about each of the binary components, but mostly, given our small 200 pc distance cut-off, will be background objects.

We see in Fig. 4(b) kinematics consistent with the Newtonian prediction of Jiang & Tremaine (2010) for the lower separation bins, and a transition to a constant relative velocity distribution for the $s > 1.5 \times 10^{-3}$ region. The faint points in this figure give each individual measurement, as in all subsequent kinematic plots, a small fraction of very small velocity individual points are not displayed as they fall below the range selected to allow a full presentation of the results. The points shown cannot be individually compared to the Newtonian predictions of Jiang & Tremaine (2010) shown, as this prediction refers to the rms values of the resulting distribution of individual points, which is what the numbered binned values given present.[1]

[1]The rms value for the relative velocities for a large sample of wide binaries modelled under Newtonian gravity and having a distribution of ellipticities and orbital projections with respect to an observer from Jiang & Tremaine (2010), given by the solid line in Fig. 4(b), can only be compared to the rms values of distributions of relative velocities for wide binaries, not to individual values for any particular wide binary. Thus, we give the individual points for the wide binaries obtained to show the full distribution of values we obtain, not as a comparison to the solid line, which can only be meaningfully compared to the binned rms values given. Notice also that the rms value of a distribution is skewed towards large values with respect to the mean, such that if one has a distribution of points appearing equally distributed above

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

A more careful exploration of the physics behind these trends can be attempted by considering an estimate of the total mass of each binary in this initial sample, and a study of the mass-velocity scalings present. We use the mass estimate in Pittordis & Sutherland (2019) of

$$\left(\frac{M}{M_\odot}\right) = 10^{0.0725(4.76-M_G)}, \quad (1)$$

where the G-band *Gaia* absolute magnitude is shown to provide a good stellar mass determination though the above equation, for main-sequence stars. Power-law fits to binned distributions of average ΔV as a function of binary mass for the data shownin Fig. 4(b) yield logarithmic slopes of 0.33 ± 0.12 and 0.32 ± 0.07 for the $s < 1.5 \times 10^{-3}$ and $s > 1.5 \times 10^{-3}$ regions, respectively. The lack of a clear $\Delta V \propto M_b^{0.5}$ scaling in the $s < 1.5 \times 10^{-3}$ region probably indicates the presence of significant kinematic contamination in our initial sample, as evident, for example, in the presence of a few spectroscopic binaries in the black points of Fig. 4(a). Also, the consistency of the two mass-velocity scalings mentioned above suggests a common origin for the relative velocities shown, again probably dominated by kinematic contaminants. Further cleaning of the sample to minimize the presence of the above and other sources of kinematic contamination is described in the following section.

3 CLEARING KINEMATIC CONTAMINANTS

In this section, we describe a sequence of three further data quality and kinematic contaminant exclusion criteria, which will be applied sequentially, such that at any point, all previous criteria are also present.The first step towards eliminating kinematic contaminants consists of introducing a distance cut-off to restrict our sample to a smaller, higher quality set where the prevalence of undetected stellar companions diminish, as all apparent magnitude-dependent systematics are reduced. Of course, any restriction in the maximum distance considered implies a trade-off in terms of a fast drop in the number of remaining binary pairs. We find that the most restrictive distance cut-off that still yields a workable number of binary pairs is 130 pc. This further restriction leaves us with 1850 binary pairs, the 3700 stars shown in the colour–magnitude diagram of Fig. 5(a), with the background light grey points being the same as the ones shown in Fig. 4(a).

The corresponding kinematic plot is presented in Fig. 5(b), where after exclusion of low-velocity signal-to-noise pairs and imposing a maximum relative velocity on the plane of the sky of $4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, as described in the case of Fig. 4(b), we are left with 1642 binary pairs. The mean distance, mean signal to noise in RA and Dec. and mean RUWE values of this sample are of 79.6 pc, 4,091, 4,047, and 1.37, respectively. We see the reduction in the distance resulting in more accurate astrometric observations.

Comparing the colour–magnitude diagrams of Fig. 5(a) to Fig. 4(a), we see that the reduction in the distance significantly reduced the number of photometric binaries in the sample in the distinct band just above the main sequence, which also appears more clearly defined. Brighter stars in the turn-off region are also diminished, as the total numbers dropped. In comparing Figs 4(b) and 5(b), we see that the distance reduction and corresponding kinematic cleaning of the sample resulted in a slight drop in the amplitude of the constantΔV_{RMS} region to the right of the plot, but no significant qualitative changes. Indeed, the mass-velocity scalings for both the region following the Newtonian predictions of Jiang & Tremaine (2010), and the one to the right of this presenting the slight drop in amplitude described above, show again power-law fits with logarithmic slopes consistent with those of Fig. 4(b), and not corresponding to any evident physical scalings.

The next quality cut introduced is to directly limit the maximum of the allowed RUWE parameters for the stars considered. This parameter gives a measure of the goodness of fit for the *Gaia* single star solution performed on each of the sources modelled, and is known to shift to larger values in cases where unresolved stellar companions are present, e.g. Belokurov et al. (2020). We introduce an upper cut-off RUWE < 1.2 such that if either the primary or the secondary of a given binary pair fails this test, the binary pair is removed from the catalogue. Comparing to the mean RUWE parameters of the samples displayed in Figs 4 and 5, of 1.34 and 1.37, it is clear that the upper limit introduced at this stage presents a fairly large cut.

In fact, the black points in the colour–magnitude diagram of Fig. 6(a) represent only the 2016 stars from 1008 binary pairs showing an extremely well-defined main-sequence region with practically no evident photometric binaries above it. Also, the turn-off region is now almost empty, as is also the case for the main sequence to the right of a colour of about 2.25, where larger errors, and hence higher probabilities of contamination from unresolved stellar companions, are evident from the underlying light grey distribution.

Fig. 6(b) gives the kinematic plot for this sample, which contains only 929 pairs of wide binaries having very high quality *Gaia* fits for both components, indeed, the mean RUWE values this time are of only 0.99. As a reflection of having a much cleaner sample than we started with, the mean signal-to-noise values for proper motion observations in RA and Dec., and parallax are now 4123, 4073, and 911. This time we see a more pronounced change with respect to the previous Figs 4(b) and 5(b), in that the region over which our results trace carefully the Newtonian predictions of Jiang & Tremaine (2010) now extends to larger separations, with results being consistent with it out to close to 10^{-2} pc. Concurrently, the amplitude of the constant ΔV_{RMS} region has again dropped and now appears at about $0.5\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. Although the total numbers have dropped considerably from the 2474 binaries of Fig. 4(b), due to the removal of binary candidates where the probabilities of kinematic contamination were much higher than for the remaining ones, the very small dynamical range in the total masses, of only about a factor of 2.2, still does not allow a clear detection of any physically significant mass velocity trend, over any of the regions in this diagram.

We now turn to the final pruning of our catalogue where we select directly on the colour–magnitude diagram for regions containing minimal presence of unresolved stellar companions, after all the cuts described previously have been sequentially applied. Belokurov et al. (2020) present an extremely detailed analysis of binarity, variability, and kinematic contamination on wide binary relative velocities as a function of RUWE parameter and location in the colour–magnitude diagram of the *Gaia* catalogue. Using their results, we define a narrow region of the upper main sequence as the final inclusion criteria. The region selected, morphologically through M_G and $B_p - R_p$ ranges, in addition to our previous RUWE filter, limits the presence of any kinematic contaminants through unresolved stellar companions to less than 5 per cent, according to the results of Belokurov et al. (2020), e.g. their fig. 10 *right* for the magnitude range we use here. Indeed, even the presence of hot or outer Jupiters can be constrained to fall rapidly for stars with RUWE indices below 1.0. As with all our previous cuts, all binaries for which either the primary or the secondary fail the colour–magnitude selection criteria are removed.

and below a prediction for an rms value, the distribution being considered will necessarily have an rms value larger than the prediction in question.

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

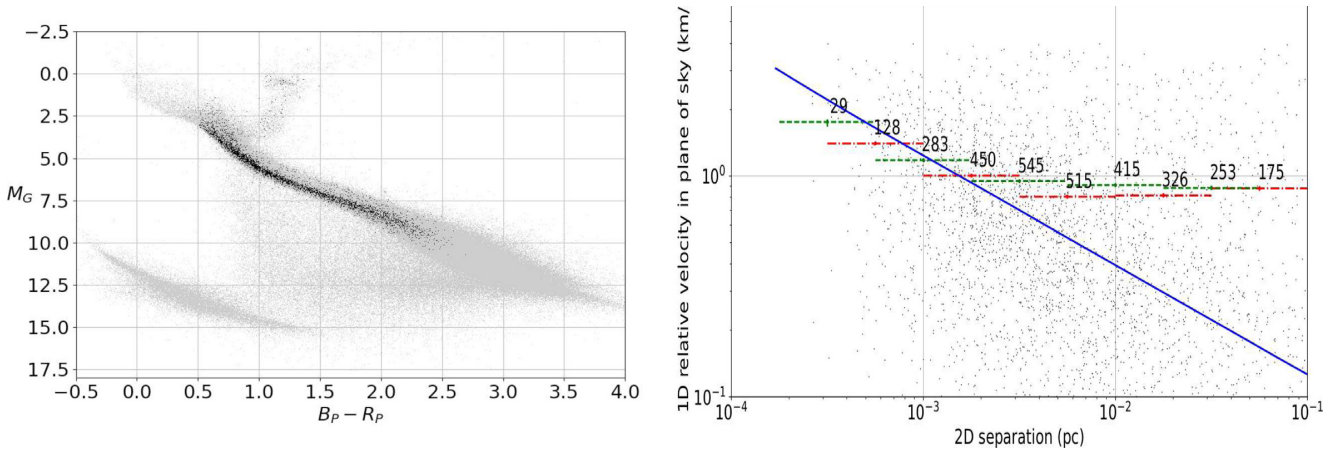

Figure 5. Left(a): The figure is analogous to the left-hand panel of Fig. 4, but contains only as the black points the 3700 stars from the 1850 binary pairs remaining after the further inclusion of a distance cut of 130 pc from the sun, resulting in a significant reduction in the numbers of photometric binaries. Right(b): The figure is analogous to the right-hand panel of Fig. 4, but this time contains only 1642 binary pairs, after the distance cut described above. Average relative errors for right ascension and declination velocity differences are of 13.17 and 15.01, respectively.

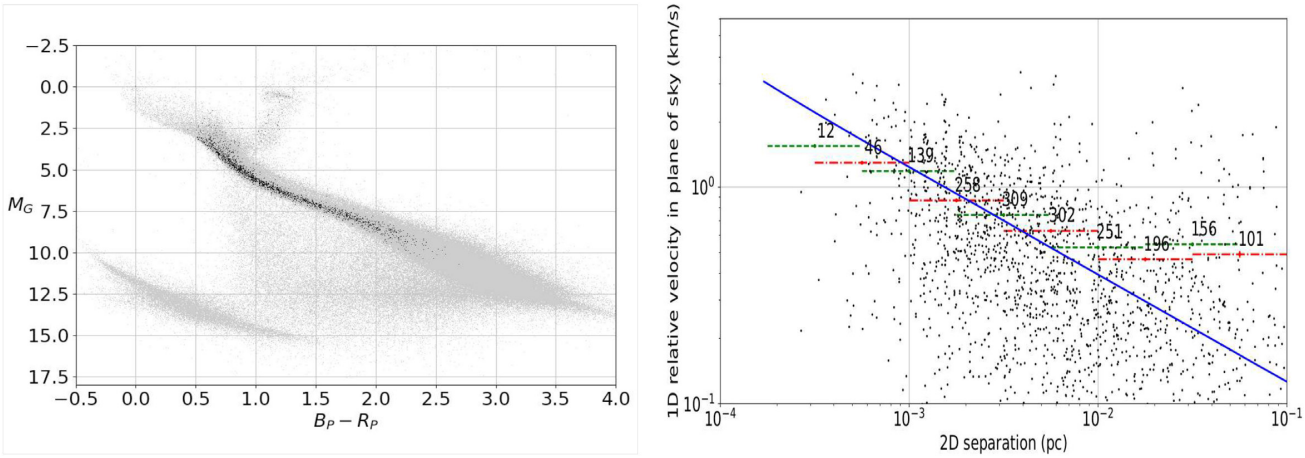

Figure 6. Left(a): The figure is analogous to the left-hand panel of Fig. 5, but contains only as black points 2016 stars from the 1030 binary pairs after the further inclusion of a RUWE < 1.2 cut, resulting in an almost complete exclusion of photometric binaries and a significant reduction in the number of post turn-off stars. Right(b): The figure is analogous to the right-hand panel of Fig. 5, but this time contains only 929 binary pairs, after the data quality cut described. Average relative errors for right ascension and declination velocity differences are of 14.39 and 15.88, respectively.

Our inclusion region in the colour–magnitude plot is shown in Fig. 7(a), and comprises only a very well-defined section of the upper main sequence. This region is defined as all stars within a ± 0.4 vertical magnitude interval of the line joining points (0.7, 4.7) and (2.0, 8.7), where the numbers give magnitude, colour coordinates. This final selection leaves only 444 binary pairs, which after the kinematic signal to noise and upper relative velocity criteria of $4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, results in the 423 binary pairs appearing in Fig. 7(b). For this final high-quality sample the average signal-to-noise values for the *Gaia* input parameters used are now of 4202, 4064, and 950 for RA and Dec. proper motions, and parallaxes, respectively. The final average relative velocity signal-to-noise values for this sample are about 50 per cent higher than those of the initial sample of Fig. 4, 14.88 and18.62 for RA and Dec., respectively.

This final kinematic plot is largely consistent with the previous one of Fig. 6(b), with the amplitude of the region showing no dependence of the ΔV_{RMS} values on separation still at $0.5\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. Also evident is the appearance of random fluctuations indicative of shot noise beginning to become relevant as the numbers of binary pairs considered have continued to fall. The region of consistency with Newtonian predictions now extends to about 10^{-2} pc.

Finally, we present in Fig. 8(a) the mass-velocity scaling for the 295 binary pairs having separations below 0.009 pc in Fig. 7(b), and the 128 such pairs with separations larger than 0.009 pc also from Fig. 7(b), in Fig. 8b. It is interesting that despite the very narrow dynamical range allowed by intrinsic stellar physics and the low numbers remaining after the very strict series of cuts applied, Fig. 8(a) shows a scaling of mean 1D velocity differences for the selected binaries of $\overline{\Delta V} \propto M_{\mathrm{b}}^{0.52\pm0.14}$ (with a correlation coefficient of 0.88, much higher than that of any previous mass-velocity scalings), perfectly consistent with Newtonian expectations, which indeed are clearly met as apparent in the $\Delta V_{\mathrm{RMS}} \propto s^{-1/2}$ scaling shown in Fig. 7 (b) for this region. This last result validates the procedure undertaken aiming at identifying an extremely high quality and high purity catalogue of isolated solar neighbourhood wide binaries, albeit including only small numbers of such stellar pairs.

Our final plot shows the mass velocity scaling for the 128 wide binary pairs having $s > 0.009$ in Fig. 7(b). The average binary mass

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

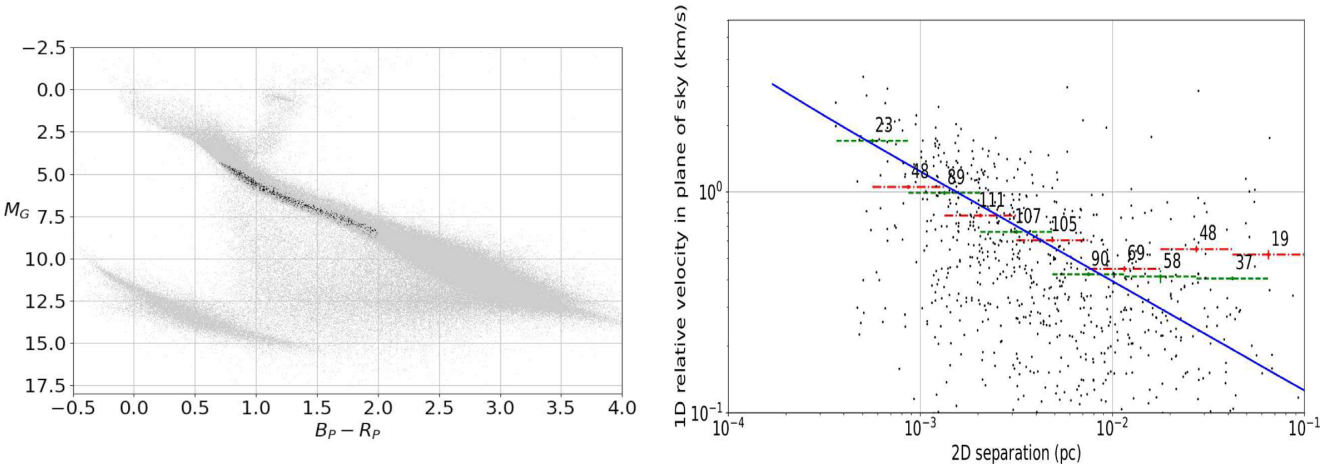

Figure 7. Left(a): The figure is analogous to the left-hand panel of Fig. 6, but contains only as black points 888 stars from the 444 binary pairs after the further inclusion of a strict colour–magnitude selection, as shown in this figure, restricting the sample to the cleanest region identified by Belokurov et al. (2020) in terms of near absence of any kinematic contaminants. Any binary pair where either component falls outside the selected region is removed. Right(b): The figure is analogous to the right-hand panel of Fig. 5, but this time contains only 423 binary pairs, after the data quality cut described. Average relative errors for right ascension and declination velocity differences are of 14.88 and 18.62, respectively.

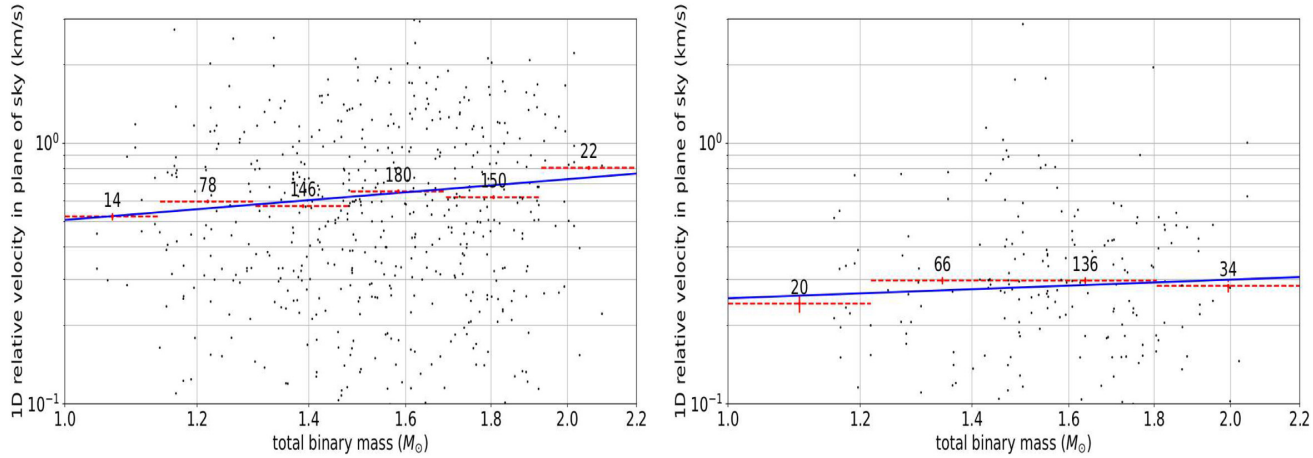

Figure 8. Left(a): This panel shows the binned average 1D relative velocity versus binary mass scaling for the binaries with separations <0.009 pc in the right-hand panel of Fig. 7, were each binary pair contributes two points, one for RA and one for Dec. observations. Average relative errors for right ascension and declination velocity differences are of 18.36 and 23.56, respectively. A power-law fit to this scaling yields $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.52\pm0.14}$. Right(b): This panel is analogous to the left one of this figure, but for separations >0.009 pc. Average relative errors for right ascension and declination velocity differences are of 6.85 and 7.24, respectively. A power-law fit to this scaling yields $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$.

for this last plot is of 1.6 $M_\odot$, as it is also the case for Fig. 8(a). The scaling in this final plot is of $\overline{\Delta V} \propto M_b^{0.24\pm0.21}$, with a correlation coefficient for these small numbers of stars of 0.63. As with the previous plot, we have divided the full mass range into as many bins as permitted by the constraint of having at least 10 data points in each bin. The *Gaia* eDR3 identifiers and relevant parameters used for these 128 wide binary pairs appear in the appendix.

We caution that the confidence intervals quoted for the mass velocity scalings in all cases are lower limits to this quantities, as they are only formal statistical ranges which ignore a series of statistic and systematic errors still present. One of the above is the variance inherent to the stellar mass estimates of equation (1), which are hard to estimate. In the similar magnitude, colour mass estimate through isochrone comparisons of El-Badry & Rix (2018), a confidence interval of $\pm0.1\,M_\odot$ for their photometric mass estimates, which closely match those of equation (1) for the main-sequence range we use, is given.

Also, given the small numbers of binary pairs available in Fig. 8(b), the shallow velocity mass scaling present and the narrow M_b dynamical range accessible, the slope obtained is sensitive, to within about 1.5 times the quoted confidence interval, to details of the various data quality cuts and kinematic contamination cleaning procedures applied. Still, there is a clear indication for a lower slope for the velocity mass scaling in the s >0.009 pc region compared to the one found in the s < 0.009 pc one, which is in fact consistent with the $V_{TF} = 0.35(M/M_\odot)^{1/4}$ km s^{-1} galactic $a < a_0$ Tully–Fisher scaling.

To summarize, hidden tertiaries with bright companions are effectively photometric binaries, which are efficiently excluded through the HR diagram selection, as well as through their lack of accurate single stellar photometric and spectroscopic solutions, evident through large values of the RUWE parameter and lack of reported radial velocities, respectively. Hidden tertiaries with dim companions and separations lower than about 10 au induce a

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

wobble on the detected member of the large-scale binary, which results in poor *Gaia* single stellar fits, and hence can be largely excluded through RUWE parameter upper limits. On this point, Belokurov et al. (2020) estimate less than 5 per cent hidden tertiaries contamination for internal separations below 10 au, on the HR region of interest, for a RUWE upper limit of 1.4, for stars within 1 kpc of the sun. These numbers can be compared to the much stricter upper RUWE cut-off 1.2 (and final average values of 0.99) and distance limit of 130 pc that we impose on our final sample. Hidden tertiaries with internal separations between about 10 and 100 au will be hard to exclude, although their frequency will drop as the distance limit of our sample is reduced. Even assuming all of these appear in our sample, from empirical estimates of tertiary stellar systems (e.g. a total fraction of 40 per cent from Tokovinin et al. 2002, 2010) we can expect less than about a 15 per cent contamination in our final sample, for equally populated logarithmic separation intervals, e.g. Clarke (2020). These systems would result in artificially enlarged relative velocities of $\lesssim 1\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ on the small fraction of affected binaries. Finally, unbound flybys are restricted through the use of a relative radial velocity filter of $<4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, a relative velocity on the plane of the sky filter also of $<4\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, and the careful de-grouping procedure that ensures only isolated binaries remain in our final sample. Given the mean average interstellar distance of 1pc in the solar neighbourhood, and the pairwise velocity dispersion of about $60\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ for these stars, the presence of unbound flybys in our final sample of wide binaries with separations below 0.1 pc, is extremely unlikely.

Throughout this project we used `Bynary`, a suite of PYTHON programs that easily downloads stellar and binary data from *Gaia*, filters and processes them via its colour–magnitude, kinematic, and velocity/mass modules to produce the graphs and statistics presented here, also allowing the user either to export data for other analysis programs and purposes or looking at the corresponding entries of any relevant binary pair in a range of possible surveys (e.g. DSS, 2MASS, AllWISE, *GALEX*, *Fermi*, or IRIS). A full description and release of `Bynary` will be the subject of a future publication.

4 COMPARISON TO PREVIOUS RESULTS

We now present a comparison of our results to a series of recent similar studies, focusing on the degree to which these are consistent with our current findings and the differences in sample selection criteria, data quality available and assumptions made when interpreting the results obtained.

4.1 Hernandez et al. (2019a)

In Hernandez et al. (2019a) the data were much scarcer, as the authors started from a *Hipparcos* wide binary selection sample by Shaya & Olling (2011), leaving only 81 binaries in the final sample (in part due to the 1/3 missing *Hipparcos* sources in DR1), with projected separations between 0.003 and 10 pc, allowing for only two bins below 0.1 pc. Thus, having one bin at close to 0.04 pc showing a clear deviation from Newtonian expectations and one slightly below 0.01 where the large error bars made it ambiguous in terms of following or not the Newtonian prediction, identified the region between 0.001 and 0.1 as crucial for detailed analysis. Fig. 5 in Hernandez et al. (2019a) does not allow more than an order-of-magnitude identification of the threshold beyond which deviations from the Newtonian prediction appear, given the very limited number of bins and the large error bars resulting from the small numbers of binaries available in that study.

Also, the large separations sampled in that study become suspicious in terms of external perturbations, given the average interstellar separations of close to 1 pc in the solar neighbourhood, the possibility of substantial kinematic contamination due to interactions with surrounding stars becomes a worry beyond a few tenths of a pc. Extending the binary separation range explored to close to 1 pc and beyond is problematic not only in terms of excluding external kinematic perturbations but also as binary identification becomes ambiguous, within the 1 pc typical interstellar separation of the average distribution.

For the above, we decided here to concentrate on an extremely clean sample of isolated binaries where an exclusion sphere many times larger than the binary separation could be defined about each, as detailed in the sample selection section, and with significant resolution in the separation interval between 0.001 and 0.1 pc. These permit a clear tracing of the Newtonian region, which serves as a control of the whole procedure in as much as an accurate agreement with the Jiang and Tremaine (2010) predictions is recovered, and a more accurate identification of any divergence occurring, within a regime highly free from contamination due to the average field star distribution.

Given the small number of bins and much larger error bars in Hernandez et al. (2019b), our present results are consistent with those previous findings, to within the significantly extended confidence intervals of that previous study.

4.2 Clarke (2020)

The highly relevant recent work of Clarke (2020) showed that the presence of blended tertiaries, cases where one or both of the two components of an observed binary are in fact small-scale binaries themselves containing an undetected component, will result in kinematic contamination inflating the inferred relative velocities of the observed large-scale binary. That study shows that a distribution of reasonable separations and masses of blended tertiary components with a high hidden tertiary fraction of 0.5, can be invoked to fully account for the results of Hernandez et al. (2019b). It is interesting that such a distribution of undetected tertiaries should become apparent through a variety of effects.

However, the results of Clarke (2020) depend critically on the details of the assumed distribution functions.There, the separation distribution of hidden tertiaries is assumed as uniformly distributed in log separation between 3 and 100 au. This means that a fraction of 0.343 of the hidden tertiaries in that study lie in the 3–10 au interval. This first inner separation interval is the one producing the greatest effect on the resulting wide binary relative velocities inferences in the context of Clarke (2020), as it is the closest of the hidden tertiaries that have the largest kinematic contamination effects on the large scale wide binary, given the Newtonian $r^{-1/2}$ scaling for velocities with separation, and as all equal logarithmic intervals were assumed there as equally populated. As Clarke (2020) acknowledges, many of the hidden tertiaries assumed in that study would imply anomalies in their location in the HR diagram, as well as astrometric solutions of degraded quality, all of which allows to remove from consideration such affected binaries. It is because of the result-defining effect blended tertiaries could have on our analysis, that we have gone through an extremely thorough cleansing process, guided by the Clarke (2020) results, and the Belokurov et al. (2020) criteria.

In that last paper, through careful and extensive simulations within *Gaia* DR2 parameters and comparisons with observations from *Gaia* DR2, it is concluded that close hidden tertiaries with separations

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

below 10 au can be detected mostly through the RUWE flag, and also in combination with taking nearby samples with high quality astrometric solutions, i.e. high signal-to-noise values in parallax and proper motions, see also Penoyre et al. (2020). Taken together, the conclusion of the two above papers is that with a RUWE filter of 1.4 and high signal-to-noise cuts for nearby samples, together with HR selection criteria as we have applied, one can exclude hidden tertiaries to below a 5 per cent contamination level, see e.g. the upper row in fig. 9 of Belokurov et al. (2020) for the hidden tertiary fraction for main-sequence stars in the magnitude range we select. This excludes the 3–10 au separation interval, which is crucial for the Clarke (2020) result. Further, it is important to note that the Belokurov et al. (2020) result is valid for the 22 month *Gaia* DR2 duration, the 1.55 times larger 34 month eDR3 time interval, at comparable data quality, translates into a $1.55^{2/3} = 1.34$ larger separation exclusion of 13.4 au. Thus, the original $log(100/3) = 1.523$ logarithmic interval assumed in Clarke (2020) should be reduced to a $log(100/13.4) = 0.873$ interval, i.e. an interval smaller by a factor of 1.75, which crucially, is missing the inner 3–13.4 au separation range. Thus, in going from DR2 to eDR3, and taking all precautions derived from the results of Belokurov et al. (2020) and Penoyre et al. (2020) we can be confident that close to half of the hidden tertiaries assumed by Clarke (2020) to reproduce the non-Newtonian high relative velocity distribution, indeed, the most relevant half, as the kinematic contamination effects of hidden tertiaries will scale with separation as $s^{-1/2}$, are not valid as an assumption in our present data and experimental set-up to explain the results obtained at large separations.

Notice also that we have adopted a much more strict (in terms of the fraction of *Gaia* systems remaining) RUWE cut-off 1.2, compared to the fiducial value of 1.4 explored in Belokurov et al. (2020) as a reference limit below which hidden tertiaries with separations below 10 au can be largely excluded (for distances of up to 1 kpc, much larger than the high quality limit of only 130 pc that we impose), and that the average RUWE for our final sample is of a very stringent 0.99. It is clear that the hidden tertiary separation interval allowed by our present set-up 13.4–100 au, would require significantly more than twice the hidden tertiary fraction assumed by Clarke (2020) to explain the high relative velocity distribution found above Newtonian expectations. As this assumed fraction in Clarke (2020) was actually of 0.5, already in the high end of empirical estimates [e.g. of between 22 per cent and 36 per cent per binary in Tokovinin et al. (2002, 2010), with no evidence of any separation dependence for this fraction], explaining our present results through the Clarke (2020) argument would not be possible even if one assumes a limiting fraction of hidden tertiaries of 1.

4.3 Pittordis & Sutherland (2019)

Using *Gaia* DR2, Pittordis & Sutherland (2019) examine the distribution of relative velocities between the components of wide binaries, for four binary separation intervals between 0.025 and 0.1 pc. Thus, they sample the region where we find a clear signal above Newtonian expectations. Just like in this study, these authors find a clear signal for relative velocities above Newtonian expectations, in an extended relative velocity distribution for all their separation bins sampled, which they mention probably corresponds to the non-Newtonian signal reported in Hernandez et al. (2019b), and which corresponds to the kinematic signal modelled by Clarke (2020) as arising from hidden tertiaries. These authors, however, model the full distribution of relative velocities obtained as the sum of Newtonian expectations and an extra distribution made up of whatever does not conform to Newtonian expectations, which they assign to flybys, unbound transient pairs that happen to present projected separations in the sampled range, without there being any physical association between them. As these authors did not calculate the mass velocity scaling within this extended tail, it is hard to see if our results are also consistent in this more physical sense, as well as in terms of the presence of a non-Newtonian high relative velocity extension.

As the authors acknowledge in Pittordis & Sutherland (2019), the flyby interpretation of the non-Newtonian high relative velocity remainder to their full distribution once the Newtonian component has been removed, is actually inconsistent with the expected behaviour of any such flybys. Whilst even in their simulations (as expected under any reasonable modelling of a flyby population) the fraction of flyby systems increases as the binary separation range increases, due to the larger cross-section for the flyby, their fits to flyby fractions once the purely Newtonian contribution is subtracted from their observations, require always diminishing flyby fractions as binary separations increase. It is not only the behaviour of the flyby fraction that is inconsistent, but also the velocity distribution. As explained previously, if relative velocities are drawn at random from the Gaussian field distribution of velocities, with a velocity dispersion close to $\sigma = 40\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, the expected pairwise velocity will also have a Gaussian distribution, with a velocity dispersion $\sqrt{2}$ times larger, and hence, for the $\approx 1\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ relative velocities observed for the wide binaries in question, the flyby distribution would have a very close to constant velocity distribution, and not the elaborate distributions peaked before Newtonian values and slowly falling thereafter required by these authors once the data are split between a Newtonian compliant set and an everything else remainder. Further, given the typical interstellar separations of1 pc, flyby fractions of order 0.5, as required by the authors in question, at binary separations of a few hundredths of a pc, appear unlikely.

Thus, there is not any evident inconsistency between our current results and those of Pittordis & Sutherland (2019), rather, a clear distinct interpretation of the results. We are merely presenting empirical data which resemble Tully–Fisher dynamics in the same general acceleration range as relevant for the galactic case (in both separation versus velocity and mass versus velocity scalings), without hazarding any detailed interpretation. Additionally, in this study we are using *Gaia* eDR3data, where typical proper motion errors have gone down by a factor of 2 with respect to the DR2 data used by Pittordis &Sutherland (2019), it is therefore entirely possible that a number of systems which they could accommodate within a Newtonian distribution within the errors, would now have to be assigned to the peculiar flyby high-velocity tail.

5 DISCUSSION

Whilst it is impossible to be certain that no kinematic contaminants remain in our final sample, the thorough pruning strategy undertaken, aimed at producing very high quality if small samples, together with the convergence of our results seen in Figs 6(b) and 7(b), strongly suggest an intrinsic origin to the asymptotically flat relative velocity signal obtained towards large separations in our final sample. The study of the internal kinematics of $s > 7000$ au binaries is still a very recent field, where significant observational and theoretic studies are in all probability yet to come. In attempting to reconcile our still incomplete present data to either Newtonian or MONDian expectations, we find that both paradigms present problems, as we discuss below.

Within a Newtonian framework, this result is troublesome for a number of reasons. First, we should expect to see a substantial population of wide binaries with separations larger than 10^{-2} pc

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

showing kinematics consistent with Newtonian expectations, much below the signal we detect. This signal shows no dependence on the separation and has a constant rms value consistent with 0.5 km s^{-1} between 10^{-2} and 10^{-1} pc. Wide binaries in the above separation range, well within the Newtonian tidal radius of ≈ 0.7 pc, following Keplerian kinematics appear only in very reduced numbers in our *Gaia* eDR3 sample.

Secondly, it is hard to explain the presence of a clearly defined population of wide binaries in the above separation range with relative velocities in the plane of the sky having rms values consistent with 0.5 km s^{-1}. If these binaries are unbound interlopers, the lifetime of such systems for the middle of the above range of 5×10^{-2} pc is a mere $(5 \times 10^{-2}/0.5) \times 10^6 \approx 10^5$ yr. Thus, given the lifetimes of the stars involved of close to 10 Gyr, the wide binaries defining the signal we find with rms relative velocity values of close to 0.5 km s^{-1} would have to be interpreted as fleeting transients lasting only of the order of 10^{-5} times the lifetimes of the stars involved.

Despite the thorough kinematic contamination removal strategy undertaken, we do expect the presence of a remaining fraction close to 40 per cent of hidden tertiaries in the separation interval 13.4–100 au, (resulting in close to one in every 7 of our final binaries, if we assume the constant distribution of hidden tertiaries per logarithmic interval of Clarke 2020), as per empirical estimates in Tokovinin (2002) and (2010). For example, a 0.3 $M_\odot$ hidden tertiary orbiting at 100 au from one member of a Newtonian wide binary composed of two 1 $M_\odot$ stars, would modify the relative velocity of the binary in question, from 0.2 km s^{-1} in the absence of the hidden tertiary, to up to about 1 km s^{-1}, depending on the relative orientations of both orbits and ellipticity. However, it appears unlikely that any remaining kinematic contaminants, hidden tertiaries or flybys, should constitute a dominant kinematic contamination effect, for the reason explained below.

If hidden tertiary contamination were a dominant factor in the non-Newtonian separation region of our final plot, to the right of 0.009 in Fig. 7(b), and given the empirical absence of a correlation between tertiary fraction and wide binary separation (e.g. see Tokovinin et al. 2010), such a contaminant would be equally present throughout the Newtonian region. Towards the small separations, it would clearly be of a very minor relative amplitude, but it would be equally dominant kinematically just to the left of the transition between both regimes. We have checked that the clear Newtonian consistent scaling we report in Fig. 8(a) for the Newtonian region of Fig. 7(b) is not lost in going to the larger separations within this regime. In fact, for the 0.003–0.009 pc separation range in Fig. 7(a), we obtain a mass-velocity scaling of $\overline{\Delta V} \propto M_{\rm b}^{0.56\pm0.28}$ with a correlation coefficient of 0.71. The uncertainty in the slope is now somewhat larger than what we obtain for the much more populated 0.0004–0.009 range in Fig. 7(b) of $\overline{\Delta V} \propto M_{\rm b}^{0.52\pm0.14}$, but crucially, remains with Newtonian expectations of 0.5, to well within the confidence intervals.

If kinematic contaminants were dominant for separations above 0.009 pc, they would be equally dominant just to the left of this value, and then we should expect a constant mass-velocity scaling across the transition. This is not what happens, as to the right of 0.009 pc the mass-velocity scaling shifts to a much smaller $\overline{\Delta V} \propto M_{\rm b}^{0.24\pm0.21}$. The use of the mass-velocity scalings in the various regions of the plots presented, furnishes an independent physical diagnostic into the likely causes of the trends seen in the velocity-separation plots. The clear Newtonian mass-velocity scaling obtained for both the entire separation range showing a Newtonian velocity-separation scaling in Fig. 7(b) and the small 0.003–0.009 region immediately preceding the divergence from Newtonian expectations, is an indication of the fact that any remaining level of kinematic contamination is not a dominant contribution, across the entire Newtonian and non-Newtonian regions.

On the other hand, if they are transients, they are also inconsistent with being chance wide encounters of pairs of stars being drawn from the average Milky Way stellar velocity distribution at the solar neighbourhood. As pointed out previously, the distribution of relative velocities of pairs will be a Gaussian having a velocity dispersion of close to 60 km s^{-1}. Given the upper kinematic cut-off of 4 km s^{-1} we introduced, much smaller than the pairwise relative velocity dispersion for stars drawn from the overall solar neighbourhood distribution, we should expect a close to constant distribution of relative velocities for the binaries we study, uniformly distributed between 0 and 4 km s^{-1}. Such a distribution of relative velocities would have an rms value slightly above 2 km s^{-1}, much higher than the 0.5 km s^{-1} we obtain, and inconsistent with this value at many times the statistical errors of the extremely high quality *Gaia* eDR3 catalogue.

Thus, random stars in the solar neighbourhood that just happen to find themselves within a distance of 5×10^{-2} pc of each other, would necessarily show relative velocities much higher than those we find. Further, the average interstellar separation at the solar neighbourhood of about 1 pc, makes the stars having separations of between 10^{-2} and10^{-1} pc and relative velocities close to 0.5 km s^{-1}, inconsistent both with Newtonian bound binaries, and chance passing encounters within the solar neighbourhood.

If the results we obtained are due to a population of bound wide binaries that display kinematics inconsistent with Newtonian dynamics, a few first-order estimates become illustrative. First, it is interesting to note that the critical separation beyond which the observed kinematics cease to follow the Newtonian predictions of Jiang & Tremaine (2010) is only slightly below, considering the accuracy allowed by the bin size imposed by the numbers of binaries in our final plot, a value of 0.035 pc. This being the threshold originally identified in Hernandez et al. (2012a) as the limit separation beyond which a binary system composed of 1 $M_\odot$ stars will find itself in the low acceleration $a < a_0$ regime, where gravitational anomalies frequently identified as signalling the presence of dark matter haloes in the context of galactic dynamics appear (e.g. Milgrom 1983 or Lelli et al. 2017).

Also, the transition appearing at the above-mentioned threshold, is reminiscent of the one between an inner baryonic-dominated regime in galaxies, and the subsequent $a < a_0$ flat rotation curve region, in that what we find is precisely such a Newtonian consistent baryonic small separation regime, which transitions to a constant relative velocity region that would imply, under a Newtonian scenario, the presence of a singular isothermal dark matter halo. At the length and velocity scales being probed, such a dominant dark matter halo around all stars would be inconsistent not only with standard structure formation scenarios but also with the total mass budget of the Milky Way disc, e.g. Kuijken & Gilmore (1991).

Finally, it would appear as an unlikely coincidence, in the absence of a causal connection, that if one extrapolates the baryonic Tully–Fisher relation between the total baryonic mass of a galaxy and the amplitude of its rotation curve, $V_{\rm TF} = 0.35(M/M_\odot)^{1/4}$ down to stellar mass scales, e.g. the 1.6 $M_\odot$ average binary masses we infer for the main sequence stars examined in Fig. 8(b), one should obtain for the corresponding flat rotation amplitude, a value of 0.4 km s^{-1}. This last is remarkably close to the rms relative velocity on the plane of the sky that we obtain for the 'flat rotation' separation region, of $\approx$ 0.5 km s^{-1}.

Within a purely Newtonian scenario, the possibility of very low luminosity undetected tertiary or higher hierarchy companions can

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

of course not be ruled out, extremely cold white dwarfs, or even black holes with periods longer than the *Gaia* temporal baseline will not produce a significant wobble (Belokurov et al. 2020) of the type the presence of which we can infer through a decrease in the goodness of fit as evident through increasing RUWE indices. This form of dark matter would of course be an *ad hoc* solution which one would have to introduce coincidentally on crossing the $a < a_0$ threshold, and of just the right amplitude to essentially match the Tully–Fisher extrapolation mentioned above.

On the other hand, our results cannot be reconciled with MOND in a straightforward way either. This is because in the most well studied versions of MOND one expects the appearance of an external field effect, such that if a system is internally in the low-acceleration regime, but embedded within a $a > a_0$ or $a \approx a_0$ larger system, like the wide binaries we study here which form part of the solar neighbourhood of the Milky Way, the modifications with respect to Newtonian predictions are expected to be very small, of the order of a 20 per cent effect, e.g. Pittordis & Sutherland (2019). Although MOND is a fundamentally empirical construction, the external field effect remains mostly a prediction, albeit recent claims of a detection in the specific context of statistical studies of rotation curves of spiral galaxies, e.g. Haghi et al. (2016) and Chae et al. (2020b).

In the absence of a definitive covariant version of MOND, it is entirely possible that a low-velocity limit for a finished theory might appear where the external field effect is absent (as in e.g. Milgrom 2011), or that such an effect might have mass or scale dependences different from what results in current well-studied versions of MOND. Many modified gravity theories having a low velocity MOND limit have also been proposed (see e.g. the very incomplete list given in the introduction) where the details, or even existence of the external field effect, have yet to be explored.

Beyond any theoretical interpretation, the results presented here suggest a 'baryonic Tully–Fisher' phenomenology at stellar scales, which undoubtedly warrants further investigation, awaiting a definitive confirmation once the current sample can be significantly enlarged, e.g. once the full *Gaia* results become available, with the expected significant increase in stars having reliable radial velocities, or the advent of future generation samples. Whether the results presented are a reflection of finely tuned hidden tertiary distributions, yet unknown astrometric systematics, or are indicative of a low acceleration modification in gravity is an interesting question which we can hope to answer over the next few years.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank an anonymous referee for constructive criticism leading to an enriched and clearer final version. The authors are indebted to Mike McCulloch for having originally suggested the collaboration, to Zac Plummer for his input in large data analysis and to Kareem El-Badry for his assistance implementing the ADQL query used. XH acknowledges financial assistance from DGAPA, UNAM grant IN106220 and CONACYT (*Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*). RAM. Cortés would like to aknowledge CONACYT for supporting this work through ascholarship. This work has used data from the European Space Agency (ESA) mission *Gaia* (https://www.cosmos.esa.int/Gaia), processed by the *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, https://www.cosmos.esa.int/web/Gaia/dpac/consortium). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, inparticular the institutions participating in the *Gaia* Multilateral Agreement.

DATA AVAILABILITY

The data underlying this article will be shared on reasonable request to the corresponding author.

REFERENCES

Banik I., Kroupa P., 2019, MNRAS, 487, 1653
Banik I., Zhao H., 2018, MNRAS, 480, 2660
Barrientos E., Mendoza S., 2018, Phys. Rev. D, 98, 084033
Bekenstein J. D., 2004, Phys. Rev. D, 70, 083509
Belokurov V. et al., 2020, MNRAS, in press
Gaia Collaboration, 2020, A&A, 649, 20
Capozziello S., de Laurentis M., 2011, Phys. Rep., 509, 167
Chae K.-H., Bernardi M., Domínguez Sánchez H., Sheth R. K., 2020a, ApJ, 903, L31
Chae K.-H., Lelli F., Desmond H., McGaugh S. S., Li P., Schombert J. M., 2020b, ApJ, 904, 51
Clarke C. J., 2020, MNRAS, 491, L72
Durazo R., Hernandez X., Cervantes Sodi B., Sanchez S. F., 2018, ApJ, 863, 107
El-Badry K., 2019, MNRAS, 482, 5018
El-Badry K., Rix H.-W., 2018, MNRAS, 480, 4884
Gaia Collaboration, 2016, A&A, 595, A1
Gaia Collaboration, 2021, A&A, 649, A1
Haghi H., Bazkiaei A. E., Zonoozi A. H., Kroupa P., 2016, MNRAS, 458, 4172
Hernandez X., Lara D. I. A. J., 2020, MNRAS, 491, 272
Hernandez X., Jiménez M. A., Allen C., 2012a, Eur Phys. J. C, 72, 1884
Hernandez X., Jiménez M. A., 2012b, ApJ, 750, 9
Hernandez X., Cortés R. A. M., Allen C., Scarpa R., 2019a, Int. J. Mod. Phys. D, 28, 1950101
Hernandez X., Sussman R. A., Nasser L., 2019b, MNRAS, 483, 147
Jiang Y. F., Tremaine S., 2010, MNRAS, 401, 977
Jiménez N. A., García G., Hernandez X., Nasser L., 2013, ApJ, 768, 142
Kuijken K., Gilmore G., 1991, ApJ, 367, L9
Lelli F., McGaugh S. S., Schombert J. M., Pawlowski M. S., 2017, ApJ, 836, 152
Lindegren L. et al., 2021, A&A,649, A2
McCulloch M. E., Lucio J. H., 2019, Astrophys. Space Sci., 364, 121
McGaugh S. S., Schombert J. M., Bothun G. D., de Blok W. J. G., 2000, ApJ, 533, L99
Milgrom M., 1983, ApJ, 270, 365
Milgrom M., 2011, AcPPB, 42, 2175
Moffat J. W., Toth V. T., 2008, ApJ, 680, 1158
Penoyre Z., Belokurov V., Evans N. W., Everall A., Koposov S. E., 2020, MNRAS, 495, 321
Pittordis C., Sutherland W., 2018, MNRAS, 480, 1778
Pittordis C., Sutherland W., 2019, MNRAS, 488, 4740
Scarpa R., Marconi G., Gilmozzi R., 2003, A&A, 405, L15
Scarpa R., Ottolina R., Falomo R., Treves A., 2017, Int. J. Mod. Phys. D, 26, 1750067
Shaya E. J., Olling R. P., 2011, ApJS, 192, 2
Smart W. M., 1968, Stellar Kinematics. Wiley, New York
Tian H.-J., El-Badry K., Rix H.-W., Gould A., 2020, ApJS, 246, 4
Tokovinin A. A., Smekhov M. G., 2002, A&A, 382, 118
Tokovinin A., Hartung M., Hayward T. L., 2010, AJ, 140, 510
Verlinde E. P., 2016, Sci. Post Phys., 2, 16
Zhao H., Famaey B., 2010, Phys. Rev. D, 81, 087304

APPENDIX: NON-NEWTONIAN BINARIES

We here present a table giving the *Gaia* eDR3 identifiers and relevant data for the 128 wide binary pairs showing relative velocities above Newtonian expectations, those appearing in Fig. 8(a).

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

Table A1. Parameters for the binary stars appearing in Fig. 8(b).

Gaia eDR3 ID$_1$	ϖ_1	$\sigma\varpi_1$	*Gaia* eDR3 ID$_2$	ϖ_2	$\sigma\varpi_2$	$\Delta V_{\rm RA}$	$\sigma\Delta V_{\rm RA}$	$\Delta V_{\rm Dec.}$	$\sigma\Delta V_{\rm Dec.}$	s
4725155516009856	9.668	0.0157	4724021644644224	9.686	0.0166	0.426	0.331	0.232	0.102	0.0148
36481628308083968	8.493	0.0197	36481593948346240	8.521	0.0149	0.059	0.163	0.405	0.090	0.0126
76300510625993344	16.631	0.0161	76300476266255488	16.637	0.0163	0.385	0.074	0.431	0.110	0.0101
98692614681349248	29.510	0.0224	98692339803443328	29.537	0.0179	0.337	0.027	0.258	0.011	0.0097
104998928046427264	16.623	0.0176	105004842216905344	16.653	0.0189	0.206	0.057	0.092	0.053	0.0324
153741691551129216	9.508	0.0165	153741760270606464	9.463	0.0164	0.361	0.052	0.102	0.048	0.0324
371552436752709504	17.577	0.0162	371552402392972032	17.557	0.0186	0.082	0.092	0.272	0.127	0.0098
507207363898475008	8.405	0.0112	507207329538738432	8.413	0.0136	0.353	0.065	0.059	0.030	0.0100
644549800855341184	10.808	0.0177	644549869574817792	10.814	0.0173	0.265	0.087	0.082	0.054	0.0114
680661782802091392	9.930	0.0192	680662573076074752	9.943	0.0195	0.183	0.030	0.159	0.043	0.0677
758958211973432704	14.957	0.0186	758958929232265472	14.981	0.0213	0.939	0.077	0.427	0.045	0.0280
796311542548505984	10.197	0.0180	796311954865365888	10.275	0.0164	0.811	0.259	0.246	0.047	0.0310
922601585552127104	15.912	0.0196	922595430863222144	15.878	0.0143	0.721	0.084	1.147	0.016	0.0495
992789150829982848	10.962	0.0161	992789872384490496	10.972	0.0181	0.219	0.069	0.494	0.067	0.0122
1021917447232306816	11.292	0.0132	1021917447232306944	11.315	0.0127	0.067	0.050	0.548	0.012	0.0094
1023887978228642176	10.788	0.0182	1023888012588380032	10.784	0.0191	0.295	0.175	0.465	0.094	0.0094
1055226293001395840	10.137	0.0126	1055226219986947200	10.101	0.0125	0.775	0.088	0.611	0.039	0.0267
1065304244783926400	9.242	0.0109	1065304068689257856	9.258	0.0109	0.001	0.117	0.136	0.043	0.0388
1112877875238798592	7.727	0.0189	1112877913895749888	7.693	0.0158	0.275	0.101	0.411	0.065	0.0190
1129061930485416960	10.839	0.0121	1129061797342364928	10.828	0.0117	0.089	0.115	0.901	0.026	0.0548
1142787168495168000	9.477	0.0108	1142786996696476288	9.485	0.0117	0.100	0.059	0.224	0.031	0.0183
1227417304334766208	8.263	0.0148	1227416514060783232	8.240	0.0142	0.180	0.092	0.422	0.040	0.0214
1346694146783637504	11.163	0.0092	1346694112423491712	11.156	0.0116	0.764	0.017	0.287	0.039	0.0111
1348285896022947584	20.547	0.0162	1348286651937191040	20.554	0.0108	0.152	0.031	0.021	0.010	0.0321
1509241238549271808	8.495	0.0127	1509241238549292800	8.479	0.0151	0.153	0.039	0.051	0.033	0.0246
1549521125478552064	20.469	0.0128	1549520949383005568	20.464	0.0153	0.076	0.013	0.045	0.027	0.0172
1580278623234613248	7.988	0.0097	1580278623234613376	7.979	0.0101	0.062	0.046	0.053	0.051	0.0094
1584402341594679808	13.138	0.0133	1584402479033634048	13.084	0.0153	0.426	0.028	0.236	0.041	0.0281
1585800851666242688	8.891	0.0115	1585800782946765312	8.895	0.0112	0.220	0.037	0.362	0.075	0.0228
1586977844504488576	29.624	0.0135	1586977737129182848	29.610	0.0115	0.252	0.009	0.188	0.018	0.0103
1661173816859019264	10.701	0.0110	1661174023017450112	10.716	0.0110	0.675	0.125	0.273	0.023	0.0394
1696726250465683968	8.822	0.0130	1696726319185160960	8.777	0.0124	0.897	0.066	0.262	0.053	0.0193
1700110684694632832	12.843	0.0113	1700112157867455232	12.863	0.0105	0.151	0.057	0.197	0.035	0.0095
1709320297168157824	9.003	0.0109	1709320292871977856	9.001	0.0105	0.524	0.029	0.009	0.057	0.0124
1719835231806217472	10.033	0.0116	1719835407900844544	10.042	0.0104	0.102	0.098	0.278	0.033	0.0411
1760471948915107200	13.272	0.0162	1760477618271932672	13.242	0.0189	0.049	0.024	0.024	0.050	0.0207
1778929480673414784	11.025	0.0195	1778930240883745536	11.069	0.0146	0.298	0.156	0.888	0.036	0.0302
1952145206786538112	9.554	0.0124	1952145172426798208	9.532	0.0136	0.179	0.110	0.032	0.087	0.0125
2140767560397457536	13.707	0.0109	2140767319879292160	13.717	0.0101	0.301	0.038	0.076	0.032	0.0352
2201834466266276864	10.213	0.0101	2201834470572701952	10.214	0.0101	0.024	0.030	0.036	0.062	0.0182
2211667368695978240	15.087	0.0117	2211667368695552896	15.068	0.0103	0.232	0.019	0.018	0.030	0.0106
2233231540491361408	15.150	0.0111	2233231330034854656	15.173	0.0102	0.455	0.010	0.116	0.022	0.0129
2260460155678348160	11.351	0.0107	2260460224397823488	11.337	0.0126	0.476	0.020	0.152	0.047	0.0127
2337837908524395776	8.443	0.0196	2337837908524639744	8.460	0.0195	0.010	0.123	0.521	0.034	0.0152
2386641518829641984	13.841	0.0196	2386641312671208960	13.837	0.0168	0.460	0.017	1.023	0.045	0.0552
2436430016675388160	7.951	0.0166	2436430119754603008	8.028	0.0175	1.006	0.192	0.625	0.094	0.0517
2514529598906714880	13.704	0.0230	2514541414361083648	13.776	0.0165	0.375	0.064	0.371	0.076	0.0237
2522327232292290688	18.212	0.0156	2522325548665111424	18.233	0.0195	0.271	0.021	0.233	0.036	0.0169
2592845200813026688	8.210	0.0128	2592845200813028992	8.183	0.0141	0.194	0.218	0.087	0.193	0.0187
2614582163441455616	8.876	0.0195	2614582064657951104	8.877	0.0190	0.234	0.200	0.338	0.179	0.0201
2663015998537909760	20.132	0.0172	2663015994242895488	20.130	0.0154	0.401	0.030	0.607	0.037	0.0118
2840600492363295616	14.914	0.0143	2840599633369837312	14.951	0.0137	0.104	0.032	0.063	0.035	0.0425
2989732545838913536	7.967	0.0156	2989735565198378368	7.958	0.0144	0.182	0.071	0.029	0.036	0.0563

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

Table A1 – *continued*

Gaia eDR3 ID$_1$	ϖ_1	$\sigma\varpi_1$	*Gaia* eDR3 ID$_2$	ϖ_2	$\sigma\varpi_2$	$\Delta V_{\rm RA}$	$\sigma\Delta V_{\rm RA}$	$\Delta V_{\rm Dec.}$	$\sigma\Delta V_{\rm Dec.}$	s
3046204180298475264	11.459	0.0147	3046204150242468480	11.472	0.0156	0.045	0.092	0.143	0.046	0.0297
3072944474884690688	10.809	0.0160	3072920942760216064	10.825	0.0154	0.076	0.024	0.078	0.022	0.0468
3076534861386561536	14.437	0.0163	3076535243639085440	14.433	0.0169	0.541	0.112	0.484	0.072	0.0133
3158926322836178816	12.818	0.0138	3158878734598549376	12.814	0.0133	0.043	0.031	0.201	0.026	0.0532
3194720889516362880	8.318	0.0165	3194720786437148032	8.315	0.0146	0.295	0.153	0.206	0.048	0.0126
3199303963218457088	9.007	0.0158	3199303963218456832	8.948	0.0156	0.213	0.035	0.268	0.047	0.0227
3286839549942183168	8.441	0.0153	3286839932195653888	8.452	0.0155	0.115	0.125	0.389	0.020	0.0279
3371529368651025664	17.554	0.0185	3371529467432172672	17.581	0.0184	0.237	0.053	0.110	0.020	0.0154
3402090259984528768	13.321	0.0192	3402090466142958464	13.300	0.0243	0.298	0.047	0.279	0.036	0.0162
3431938839582893568	7.988	0.0197	3431938766565511424	8.053	0.0135	0.525	0.036	0.408	0.086	0.0305
3451267120128948992	24.064	0.0196	3451266742171824640	24.044	0.0225	0.487	0.015	0.205	0.010	0.0121
3497346209336507520	8.002	0.0260	3497346205040949248	8.085	0.0189	0.825	0.312	1.775	0.348	0.0160
3538247870092026624	13.531	0.0155	3538249588079338112	13.600	0.0233	0.038	0.092	0.006	0.024	0.0515
3550081879381593728	29.831	0.0262	3550084490721711872	29.799	0.0178	0.045	0.036	0.215	0.014	0.0382
3557719293306114560	17.682	0.0156	3557719293306114944	17.717	0.0160	0.113	0.077	0.141	0.034	0.0092
3731743568479226880	8.399	0.0181	3731742812564982912	8.393	0.0162	0.375	0.253	0.038	0.224	0.0136
3792739899447945216	9.297	0.0145	3792740006822516608	9.240	0.0150	0.206	0.078	0.762	0.163	0.0128
3836090722352641536	8.882	0.0221	3836090726648115968	8.856	0.0189	0.082	0.117	0.023	0.221	0.0147
3907643060734192896	17.653	0.0190	3907643060733826432	17.696	0.0191	0.040	0.166	0.292	0.020	0.0115
3975129194660883328	25.376	0.0270	3975223065466473216	25.375	0.0240	0.005	0.181	0.197	0.014	0.0140
4218533748765026560	12.139	0.0149	4218533959216594176	12.141	0.0142	0.300	0.105	0.408	0.099	0.0116
4395523033138822656	9.178	0.0197	4395522998779760128	9.204	0.0190	0.072	0.028	0.414	0.086	0.0102
4401991146507698944	7.787	0.0139	4401990394889506304	7.818	0.0117	0.317	0.061	0.288	0.035	0.0144
4404823011724525184	8.574	0.0191	4404823011724524416	8.586	0.0167	0.010	0.041	0.296	0.106	0.0125
4407544268641139712	9.432	0.0169	4407541313703639424	9.457	0.0170	0.517	0.045	0.213	0.059	0.0107
4430185068482324864	9.967	0.0140	4430185034123000960	9.986	0.0152	0.240	0.066	0.221	0.016	0.0214
4474801257476653952	8.125	0.0131	4474801218817508864	8.160	0.0121	0.055	0.023	0.104	0.043	0.0112
4545496243069399808	14.315	0.0146	4545496075567671808	14.311	0.0152	0.031	0.059	0.805	0.047	0.0148
4577272270853565952	10.531	0.0107	4577271961615916032	10.525	0.0130	0.175	0.063	0.395	0.033	0.0203
4584470739116877056	8.129	0.0133	4584470704757140096	8.151	0.0112	0.266	0.049	0.005	0.065	0.0435
4628920897552913792	9.532	0.0106	4628920970569782400	9.495	0.0099	0.330	0.085	0.085	0.045	0.0396
4629399567364049280	8.620	0.0108	4629399567364049664	8.597	0.0105	0.263	0.240	0.439	0.211	0.0124
4701607897573989248	10.438	0.0135	4701607893278187648	10.446	0.0112	0.589	0.078	0.127	0.060	0.0156
4729517591496033920	9.250	0.0096	4729517591496033152	9.226	0.0110	0.154	0.019	0.200	0.023	0.0098
4810651860180442624	10.972	0.0091	4810651928899919616	11.014	0.0098	0.170	0.010	0.186	0.088	0.0091
4813061852229522432	13.247	0.0101	4813061676134636928	13.273	0.0099	0.390	0.026	0.023	0.063	0.0154
4819741759028427904	8.253	0.0122	4819741763325357056	8.275	0.0136	1.958	0.027	0.334	0.023	0.0093
4822945740208994176	9.424	0.0118	4822945705849256192	9.423	0.0126	0.292	0.052	0.151	0.034	0.0118
4876470412926321280	9.184	0.0145	4876443990287014912	9.211	0.0115	0.146	0.073	0.025	0.053	0.0234
4879098280075566208	13.442	0.0108	4879098383154780672	13.461	0.0119	0.182	0.038	0.326	0.126	0.0154
4899504459972848512	13.027	0.0153	4899498069061515008	13.019	0.0155	0.117	0.036	0.002	0.169	0.0928
4902812787380558208	7.760	0.0145	4902812787380558976	7.781	0.0117	0.486	0.024	0.248	0.213	0.0096
4915145322115519104	8.021	0.0102	4915145322115519232	7.980	0.0103	0.008	0.021	0.371	0.019	0.0096
4981101348174544512	8.474	0.0116	4981101348174544768	8.433	0.0127	0.754	0.047	0.346	0.107	0.0201
5036326759219158272	9.258	0.0140	5035575758417810688	9.248	0.0142	0.025	0.033	0.120	0.061	0.0438
5099953023216735872	9.557	0.0157	5099953057577400704	9.553	0.0146	0.076	0.236	0.273	0.071	0.0314
5114547700047886976	11.807	0.0155	5114544745110388352	11.793	0.0145	0.058	0.175	0.098	0.087	0.0178
5179618511869510272	8.477	0.0155	5179618752387678592	8.463	0.0170	1.756	0.063	0.359	0.203	0.0659
5181911238426924288	8.353	0.0153	5181911234131665920	8.409	0.0162	0.342	0.051	0.226	0.035	0.0121
5269452631947873152	8.166	0.0091	5269452636245616128	8.130	0.0102	0.269	0.055	0.118	0.155	0.0169
5796674577807917184	20.093	0.0124	5796675471162119040	20.090	0.0139	0.158	0.007	0.141	0.016	0.0282
5800969407655752192	8.263	0.0115	5800969235854202496	8.289	0.0107	0.053	0.031	0.071	0.017	0.0402
5891531404470141824	38.998	0.0228	5891544873500692608	39.050	0.0145	0.151	0.050	0.035	0.043	0.0602

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

Table A1 – *continued*

Gaia eDR3 ID$_1$	ϖ_1	$\sigma\varpi_1$	*Gaia* eDR3 ID$_2$	ϖ_2	$\sigma\varpi_2$	$\Delta V_{\rm RA}$	$\sigma\Delta V_{\rm RA}$	$\Delta V_{\rm Dec.}$	$\sigma\Delta V_{\rm Dec.}$	s
6078554071716755456	8.231	0.0171	6078554140436217728	8.269	0.0171	0.339	0.195	0.020	0.015	0.0871
6193279279612173952	33.480	0.0312	6193280031230266752	33.433	0.0227	0.053	0.085	0.292	0.020	0.0463
6206044369095120512	8.295	0.0190	6206045125009768192	8.356	0.0273	0.007	0.172	0.520	0.153	0.0157
6238116298643720192	7.778	0.0174	6238116298643719552	7.789	0.0155	0.182	0.057	0.128	0.062	0.0215
6249410860041044480	9.608	0.0202	6249411203638655232	9.647	0.0216	0.050	0.136	0.299	0.165	0.0442
6378374125048999424	9.181	0.0138	6378374052033393024	9.211	0.0124	0.555	0.075	0.029	0.031	0.0140
6398232816875801856	8.014	0.0142	6398232778219135744	8.022	0.0104	0.575	0.150	0.151	0.124	0.0240
6447718261829058816	10.914	0.0164	6447718467987494784	10.918	0.0171	0.056	0.173	0.248	0.054	0.0351
6458626310529028352	13.330	0.0129	6458626271874014208	13.315	0.0130	0.027	0.060	0.009	0.013	0.0292
6464392012066637440	9.391	0.0146	6464391977706899712	9.385	0.0163	0.168	0.024	0.153	0.020	0.0390
6562582828536563328	10.555	0.0142	6562581969543104640	10.554	0.0120	0.020	0.179	0.046	0.053	0.0623
6586315275923449856	8.471	0.0211	6586315207203972224	8.504	0.0215	0.136	0.190	0.285	0.085	0.0182
6615293145390228352	8.513	0.0189	6615291667921479552	8.535	0.0178	1.031	0.055	0.867	0.028	0.0125
6620898657532005120	29.995	0.0148	6620893645304242176	29.959	0.0200	0.059	0.067	0.222	0.044	0.0262
6639645128923820160	10.611	0.0135	6639645128923818624	10.626	0.0145	0.007	0.011	0.028	0.012	0.0114
6658696396962053120	8.362	0.0180	6658696401257998464	8.365	0.0159	0.223	0.045	0.256	0.018	0.0179
6681883211702702208	8.539	0.0194	6681883039904009856	8.595	0.0174	0.329	0.120	0.550	0.042	0.0203
6695911949280082432	9.200	0.0151	6695911880560604672	9.193	0.0134	0.424	0.082	0.151	0.032	0.0102
6768864992462040832	14.645	0.0135	6768865714016553344	14.623	0.0144	0.385	0.051	0.037	0.036	0.0261
6812424241536340864	21.290	0.0367	6812422832786523776	21.189	0.0178	2.871	0.134	0.590	0.013	0.0281
6840365718216434816	14.041	0.0222	6840365615137220096	14.038	0.0158	0.319	0.070	0.083	0.066	0.0219
6859531958238411904	12.022	0.0180	6859531752079979776	11.999	0.0233	0.011	0.025	0.287	0.061	0.0458

Note. The first three columns give *Gaia* eDR3 identifiers, parallax, and parallax errors for the primaries, while the following three columns give the corresponding information for the secondaries. Columns 7–10 give relative velocities for the pair in RA, the error in this quantity, relative velocities for the pair in Dec., and the error for this quantity. The final column shows the projected separation on the pane of the sky for each binary pair. Units for parallaxes, velocities and separations are mas, km s^{-1}, and pc, respectively.

This paper has been typeset from a TEX/LATEX file prepared by the author.

Downloaded from https://academic.oup.com/mnras/article/509/2/2304/6412540 by Universidad Nacional Autonoma de Mexico user on 15 December 2023

Bibliografía

Banik, Indranil y Hongsheng Zhao (oct. de 2018). «Testing gravity with wide binary stars like α Centauri». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 480.2, págs. 2660-2688. DOI: 10.1093/mnras/sty2007. arXiv: 1805.12273 [astro-ph.GA].

Barrientos, E. y S. Mendoza (oct. de 2018). «MOND as the weak field limit of an extended metric theory of gravity with a matter-curvature coupling». En: *Phys.Rev.D* 98.8, 084033, pág. 084033. DOI: 10.1103/PhysRevD.98.084033. arXiv: 1808.01386 [gr-qc].

Bekenstein, Jacob D. (oct. de 2004). «Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm». En: *Phys.Rev.D* 70.8, 083509, pág. 083509. DOI: 10.1103/PhysRevD.70.083509. arXiv: astro-ph/0403694 [astro-ph].

Capozziello, Salvatore y Mariafelicia de Laurentis (dic. de 2011). «Extended Theories of Gravity». En: *Phys.Rep.* 509.4, págs. 167-321. DOI: 10.1016/j.physrep.2011.09.003. arXiv: 1108.6266 [gr-qc].

Chae, Kyu-Hyun (ago. de 2023a). «Breakdown of the Newton-Einstein Standard Gravity at Low Acceleration in Internal Dynamics of Wide Binary Stars». En: *Ap.J.* 952.2, 128, pág. 128. DOI: 10.3847/1538-4357/ace101. arXiv: 2305.04613 [astro-ph.GA].

Chae, Kyu-Hyun (sep. de 2023b). «Robust Evidence for the Breakdown of Standard Gravity at Low Acceleration from Statistically Pure Binaries Free of Hidden Companions». En: *arXiv e-prints*, arXiv:2309.10404, arXiv:2309.10404. DOI: 10.48550/arXiv.2309.10404. arXiv: 2309.10404 [astro-ph.GA].

Chae, Kyu-Hyun et al. (nov. de 2020a). «On the Presence of a Universal Acceleration Scale in Elliptical Galaxies». En: *Ap.J.Lett.* 903.2, L31, pág. L31. DOI: 10.3847/2041-8213/abc2d3. arXiv: 2010.10779 [astro-ph.GA].

Chae, Kyu-Hyun et al. (nov. de 2020b). «Testing the Strong Equivalence Principle: Detection of the External Field Effect in Rotationally Supported Galaxies». En: *Ap.J.* 904.1, 51, pág. 51. DOI: 10.3847/1538-4357/abbb96. arXiv: 2009.11525 [astro-ph.GA].

Clarke, C. J. (ene. de 2020). «The distribution of relative proper motions of wide binaries in Gaia DR2: MOND or multiplicity?» En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 491.1, págs. L72-L75. DOI: 10.1093/mnrasl/slz161. arXiv: 1910.10256 [astro-ph.SR].

Durazo, R. et al. (ago. de 2018). «A Test of MONDian Gravity in $\sim$300 Pressure-supported Elliptical Galaxies from the MaNGA Survey». En: *Ap.J.* 863.1, 107, pág. 107. DOI: 10.3847/1538-4357/aacf97. arXiv: 1804.01581 [astro-ph.GA].

El-Badry, Kareem (feb. de 2019). «The geometric challenge of testing gravity with wide binaries». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 482.4, págs. 5018-5022. DOI: 10.1093/mnras/sty3109. arXiv: 1810.13397 [astro-ph.SR].

El-Badry, Kareem y Hans-Walter Rix (nov. de 2018). «Imprints of white dwarf recoil in the separation distribution of Gaia wide binaries». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 480.4, págs. 4884-4902. DOI: 10.1093/mnras/sty2186. arXiv: 1807.06011 [astro-ph.SR].

Fabricius, C. et al. (mar. de 2002). «The Tycho double star catalogue». En: *Astron.&Astrop.* 384, págs. 180-189. DOI: 10.1051/0004-6361:20011822.

Gaia Collaboration et al. (ago. de 2018). «Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties». En: *Astron.&Astrop.* 616, A1, A1. DOI: 10.1051/0004-6361/201833051. arXiv: 1804.09365 [astro-ph.GA].

Gaia Collaboration et al. (mayo de 2021). «Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties». En: *Astron.&Astrop.* 649, A1, A1. DOI: 10.1051/0004-6361/202039657. arXiv: 2012.01533 [astro-ph.GA].

Haghi, Hosein et al. (jun. de 2016). «Declining rotation curves of galaxies as a test of gravitational theory». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 458.4, págs. 4172-4187. DOI: 10.1093/mnras/stw573. arXiv: 1603.02685 [astro-ph.GA].

Hernandez, X. (oct. de 2023). «Internal kinematics of Gaia DR3 wide binaries: anomalous behaviour in the low acceleration regime». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 525.1, págs. 1401-1415. DOI: 10.1093/mnras/stad2306. arXiv: 2304.07322 [astro-ph.GA].

Hernandez, X. y M. A. Jiménez (mayo de 2012). «The Outskirts of Globular Clusters as Modified Gravity Probes». En: *Ap.J.* 750.1, 9, pág. 9. DOI: 10.1088/0004-637X/750/1/9. arXiv: 1108.4021 [astro-ph.CO].

Hernandez, X., M. A. Jiménez y C. Allen (feb. de 2012). «Wide binaries as a critical test of classical gravity». En: *European Physical Journal C* 72, 1884, pág. 1884. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1884-6. arXiv: 1105.1873 [astro-ph.GA].

Hernandez, X. y A. J. Lara-D I (ene. de 2020). «Asymptotic kinematics of globular clusters: The emergence of a Tully-Fisher relation». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 491.1, págs. 272-280. DOI: 10.1093/mnras/stz3038. arXiv: 1909.04192 [astro-ph.GA].

Hernandez, X. et al. (ene. de 2019). «Challenging a Newtonian prediction through Gaia wide binaries». En: *International Journal of Modern Physics D* 28.8, 1950101, pág. 1950101. DOI: 10.1142/S0218271819501013. arXiv: 1810.08696 [astro-ph.GA].

Hernandez, X. et al. (nov. de 2023). «Statistical analysis of the gravitational anomaly in Gaia wide binaries.» En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* DOI: 10.1093/mnras/stad3446. arXiv: 2309.10995 [astro-ph.GA].

Høg, E. et al. (mayo de 2000). «Construction and verification of the Tycho-2 Catalogue». En: *Astron.&Astrop.* 357, págs. 367-386.

Jiang, Yan-Fei y Scott Tremaine (ene. de 2010). «The evolution of wide binary stars». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 401.2, págs. 977-994. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15744.x. arXiv: 0907.2952 [astro-ph.GA].

Jiménez, M. A. et al. (mayo de 2013). «The Massive Elliptical Galaxy NGC 4649 from the Perspective of Extended Gravity». En: *Ap.J.* 768.2, 142, pág. 142. DOI: 10.1088/0004-637X/768/2/142. arXiv: 1210.8183 [astro-ph.CO].

Koposov, Sergey E. et al. (sep. de 2015). «Kinematics and Chemistry of Recently Discovered Reticulum 2 and Horologium 1 Dwarf Galaxies». En: *Ap.J.* 811.1, 62, pág. 62. DOI: 10.1088/0004-637X/811/1/62. arXiv: 1504.07916 [astro-ph.GA].

Kuijken, Konrad y Gerard Gilmore (ene. de 1991). «The Galactic Disk Surface Mass Density and the Galactic Force K Z at Z = 1.1 Kiloparsecs». En: *Ap.J.Lett.* 367, pág. L9. DOI: 10.1086/185920.

Lelli, Federico, Stacy S. McGaugh y James M. Schombert (jun. de 2017). «Testing Verlinde's emergent gravity with the radial acceleration relation». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 468.1, págs. L68-L71. DOI: 10.1093/mnrasl/slx031. arXiv: 1702.04355 [astro-ph.GA].

Lindegren, L. et al. (mayo de 2021). «Gaia Early Data Release 3. The astrometric solution». En: *Astron.&Astrop.* 649, A2, A2. DOI: 10.1051/0004-6361/202039709. arXiv: 2012.03380 [astro-ph.IM].

Manchanda, Dhruv, Will Sutherland y Charalambos Pittordis (ene. de 2023). «Wide Binaries as a Modified Gravity test: prospects for detecting triple-system contamination». En: *The Open Journal of Astrophysics* 6, E2. DOI: 10.21105/astro.2210.07781. arXiv: 2210.07781 [astro-ph.GA].

Marrese, P. M. et al. (ene. de 2019). «Gaia Data Release 2. Cross-match with external catalogues: algorithms and results». En: *Astron.&Astrop.* 621, A144, A144. DOI: 10.1051/0004-6361/201834142. arXiv: 1808.09151 [astro-ph.SR].

McCulloch, M. E. y J. H. Lucio (ago. de 2019). «Testing Newton/GR, MoND and quantised inertia on wide binaries». En: *Astrop.&Sp.Sc.* 364.8, 121, pág. 121. DOI: 10.1007/s10509-019-3615-z. arXiv: 1908.01434 [physics.gen-ph].

McGaugh, S. S. et al. (abr. de 2000). «The Baryonic Tully-Fisher Relation». En: *Ap.J.Lett.* 533.2, págs. L99-L102. DOI: 10.1086/312628. arXiv: astro-ph/0003001 [astro-ph].

Milgrom, M. (dic. de 1984). «Isothermal spheres in the modified dynamics». En: *Ap.J.* 287, págs. 571-576. DOI: 10.1086/162716.

Milgrom, Mordehai (nov. de 2011). «MOND–particularly as modified inertia». En: *Acta Physica Polonica Series B* 42. DOI: 10.5506/APhysPolB.42.2175.

Moffat, J. W. y V. T. Toth (jun. de 2008). «Testing Modified Gravity with Globular Cluster Velocity Dispersions». En: *Ap.J.* 680.2, págs. 1158-1161. DOI: 10.1086/587926. arXiv: 0708.1935 [astro-ph].

Oh, Semyeong et al. (jun. de 2017). «Comoving Stars in Gaia DR1: An Abundance of Very Wide Separation Comoving Pairs». En: *As.J.* 153.6, 257, pág. 257. DOI: 10.3847/1538-3881/aa6ffd. arXiv: 1612.02440 [astro-ph.SR].

Penoyre, Zephyr et al. (jun. de 2020). «Binary deviations from single object astrometry». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 495.1, págs. 321-337. DOI: 10.1093/mnras/staa1148. arXiv: 2003.05456 [astro-ph.GA].

Pittordis, Charalambos y Will Sutherland (oct. de 2018). «Testing modified-gravity theories via wide binaries and GAIA». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 480.2, págs. 1778-1795. DOI: 10.1093/mnras/sty1578. arXiv: 1711.10867 [astro-ph.CO].

Pittordis, Charalambos y Will Sutherland (oct. de 2019). «Testing modified gravity with wide binaries in Gaia DR2». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 488.4, págs. 4740-4752. DOI: 10.1093/mnras/stz1898. arXiv: 1905.09619 [astro-ph.CO].

Salucci, Paolo et al. (mar. de 2012). «Dwarf spheroidal galaxy kinematics and spiral galaxy scaling laws». En: *Mon.Not.Roy.Astr.Soc.* 420.3, págs. 2034-2041. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.20144.x. arXiv: 1111.1165 [astro-ph.CO].

Sanders, Robert H. y Stacy S. McGaugh (ene. de 2002). «Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter». En: *An.Rev.Astron.&Astrop.* 40, págs. 263-317. DOI: 10.1146/annurev.astro.40.060401.093923. arXiv: astro-ph/0204521 [astro-ph].

Scarpa, R., G. Marconi y R. Gilmozzi (jul. de 2003). «Using globular clusters to test gravity in the weak acceleration regime». En: *Astron.&Astrop.* 405, págs. L15-L18. DOI: 10.1051/0004-6361:20030762. arXiv: astro-ph/0305388 [astro-ph].

Scarpa, R. et al. (ene. de 2011). «Testing Newtonian gravity with distant globular clusters: NGC 1851 and NGC 1904». En: *Astron.&Astrop.* 525, A148, A148. DOI: 10.1051/0004-6361/201014462. arXiv: 1008.3526 [astro-ph.GA].

Scarpa, Riccardo et al. (ene. de 2017). «Dynamics of wide binary stars: A case study for testing Newtonian dynamics in the low acceleration regime». En: *International Journal of Modern Physics D* 26.7, 1750067, pág. 1750067. DOI: 10.1142/S0218271817500675. arXiv: 1611.08635 [astro-ph.GA].

Shaya, Ed J. y Rob P. Olling (ene. de 2011). «Very Wide Binaries and Other Comoving Stellar Companions: A Bayesian Analysis of the Hipparcos Catalogue». En: *Ap.J.Sup.Ser.* 192.1, 2, pág. 2. DOI: 10.1088/0067-0049/192/1/2. arXiv: 1007.0425 [astro-ph.GA].

Smart, W M (ene. de 1968). *STELLAR KINEMATICS.* URL: https://www.osti.gov/biblio/4799246.

Tian, Hai-Jun et al. (ene. de 2020). «The Separation Distribution of Ultrawide Binaries across Galactic Populations». En: *Ap.J.Sup.Ser.* 246.1, 4, pág. 4. DOI: 10.3847/1538-4365/ab54c4. arXiv: 1909.04765 [astro-ph.GA].

Tokovinin, A. A. y M. G. Smekhov (ene. de 2002). «Statistics of spectroscopic subsystems in visual multiple stars». En: *Astron.&Astrop.* 382, págs. 118-123. DOI: 10.1051/0004-6361:20011586.

Tokovinin, Andrei, Markus Hartung y Thomas L. Hayward (ago. de 2010). «Subsystems in Nearby Solar-type Wide Binaries». En: *As.J.* 140.2, págs. 510-517. DOI: 10.1088/0004-6256/140/2/510. arXiv: 1006.1253 [astro-ph.SR].

Verlinde, Erik (mayo de 2017). «Emergent Gravity and the Dark Universe». En: *SciPost Physics* 2.3, 016, pág. 016. DOI: 10.21468/SciPostPhys.2.3.016. arXiv: 1611.02269 [hep-th].

Zhao, Hongsheng y Benoit Famaey (abr. de 2010). «Comparing different realizations of modified Newtonian dynamics: Virial theorem and elliptical shells». En: *Phys.Rev.D* 81.8, 087304, pág. 087304. DOI: 10.1103/PhysRevD.81.087304. arXiv: 1003.4753 [astro-ph.CO].