

# GRAVIMETRA

*Grav*itational *Met*rology & *A*stronomy

GMAC

*Grav*itational *M*etrology for *A*strophysics and *C*osmology

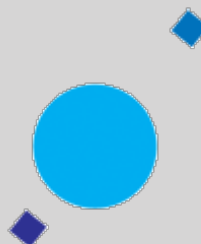
BLUe\_GanG

*B*orders of *L*ocal *U*niverse\_*G*aia and not *G*aia

Mariateresa Crosta  
INAF- Osservatorio Astrofisico di Torino

AUDIZIONI RSN2 - INAF  
16 Maggio 2022

INAF



ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA  
NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

# Aspetti scientifici/tecnologici

**"Metrologia Gravitazionale&Astronomia" = Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere

# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere

Spacetime metrics, relativistic observers and observables for

# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale

Programma in itinere

Space time splitting

$$P(u)_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta} + u_{\alpha}u_{\beta}$$

$$T(u)_{\alpha\beta} = -u_{\alpha}u_{\beta}$$

$$ds^2 = g_{\alpha\beta}dx^{\alpha}dx^{\beta}$$

static, zamo or not zamo?

angles, distances, doppler shift, velocities,....

Spacetime metrics, relativistic observers and observables for

# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale

Programma in itinere

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta$$

Space time splitting

$$P(u)_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta} + u_\alpha u_\beta$$

$$T(u)_{\alpha\beta} = -u_\alpha u_\beta$$

static, zamo or not zamo?

angles, distances, doppler shift, velocities,....

Spacetime metrics, relativistic observers and observables for

Solar System  
scale

Galaxy  
scale

Extragalactic  
scales

# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale

Programma in itinere

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta$$

Space time splitting

$$P(u)_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta} + u_\alpha u_\beta$$

$$T(u)_{\alpha\beta} = -u_\alpha u_\beta$$

static, zamo or not zamo?

angles, distances, doppler shift, velocities,....

Spacetime metrics, relativistic observers and observables for

Solar System  
scale

- Local GR tests
- Relativistic astrometric parameters for stars and exoplanets
- Lensing

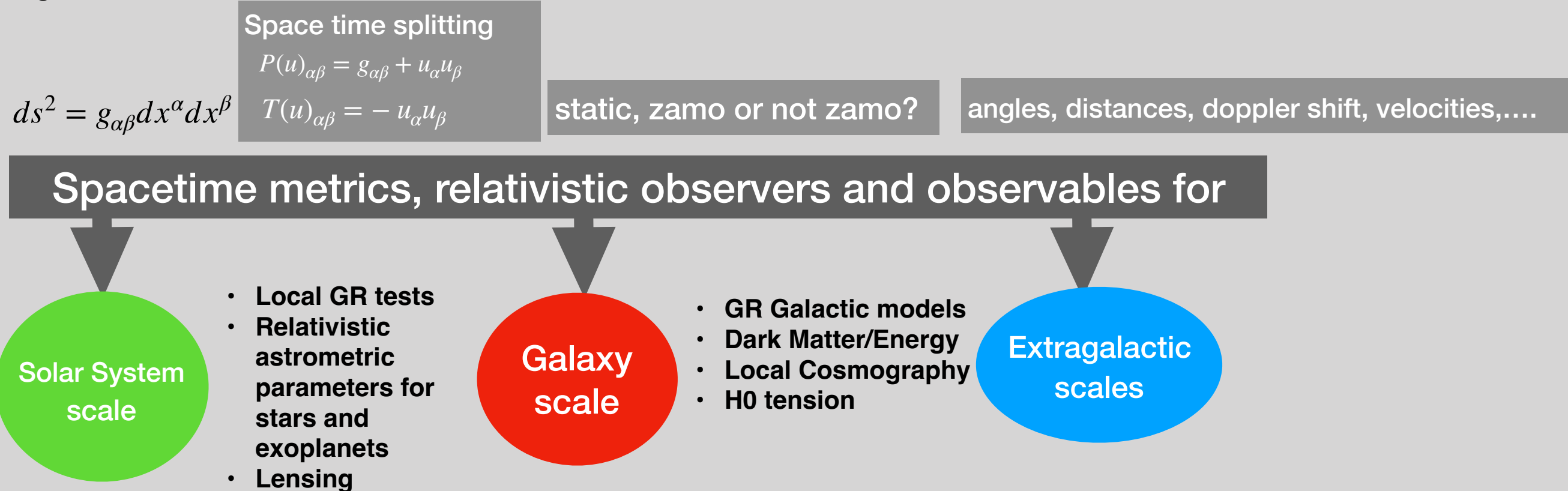
Galaxy  
scale

Extragalactic  
scales

# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale

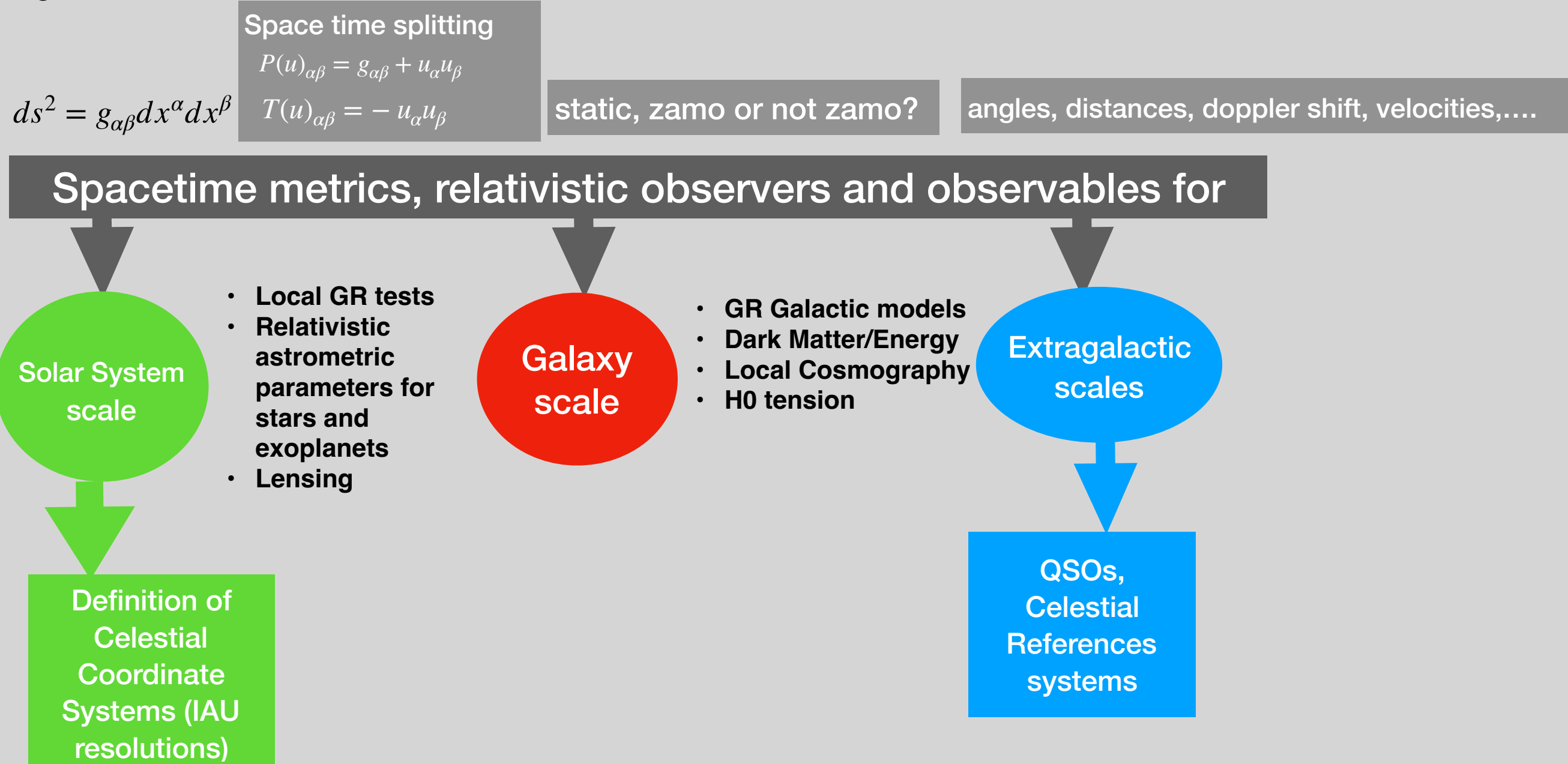
Programma in itinere





# Aspetti scientifici/tecnologici

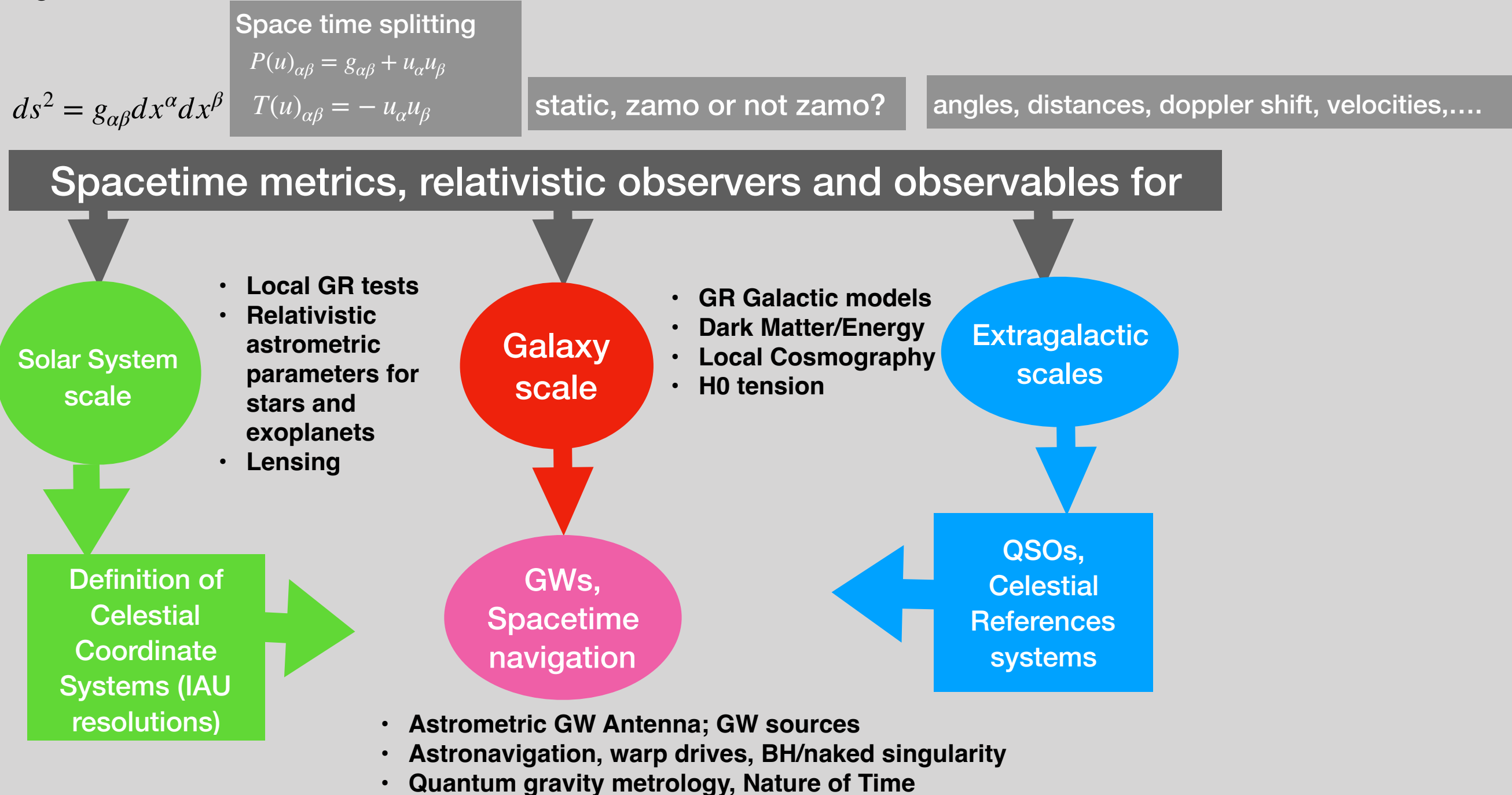
"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere





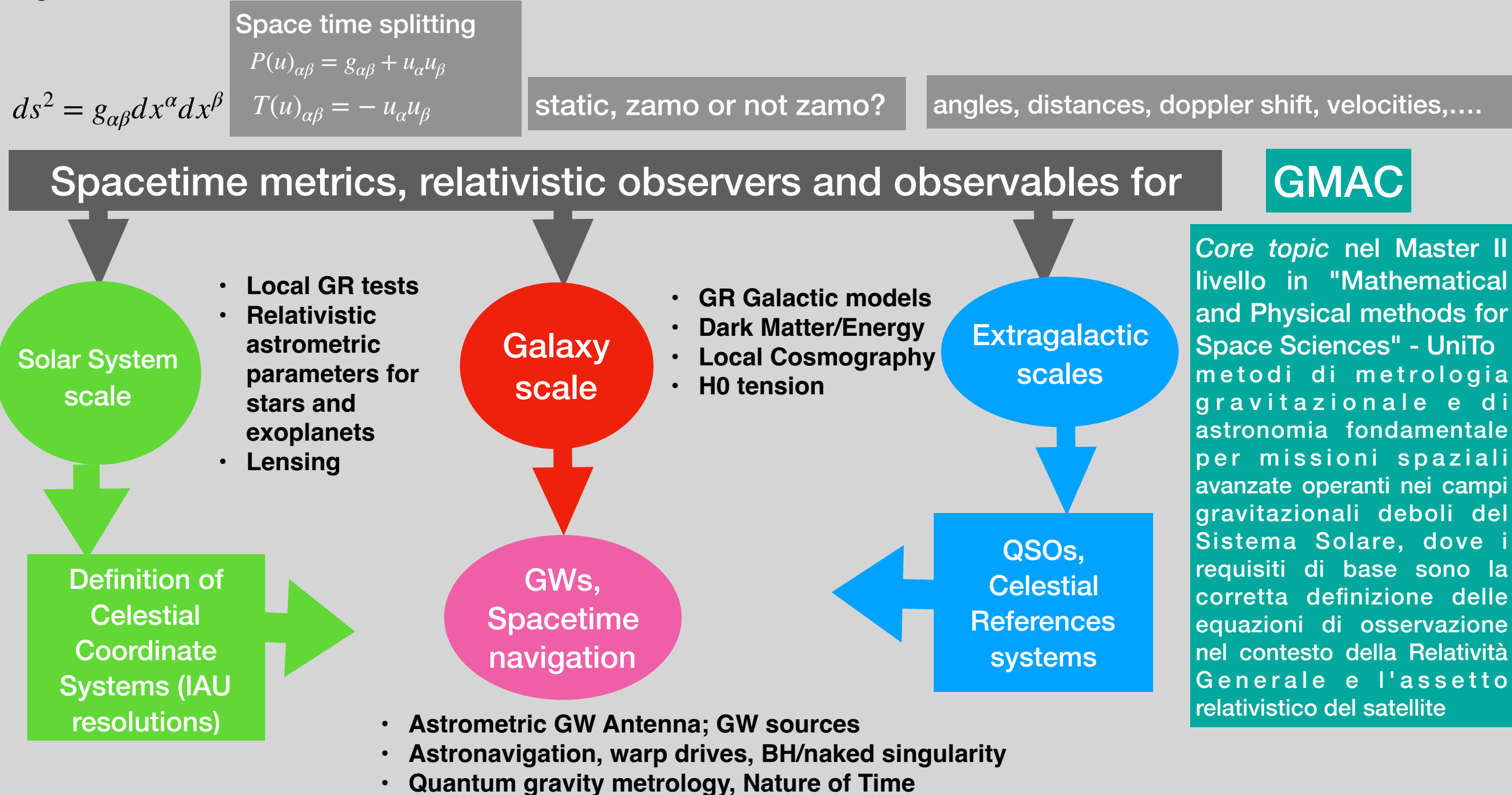
# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere



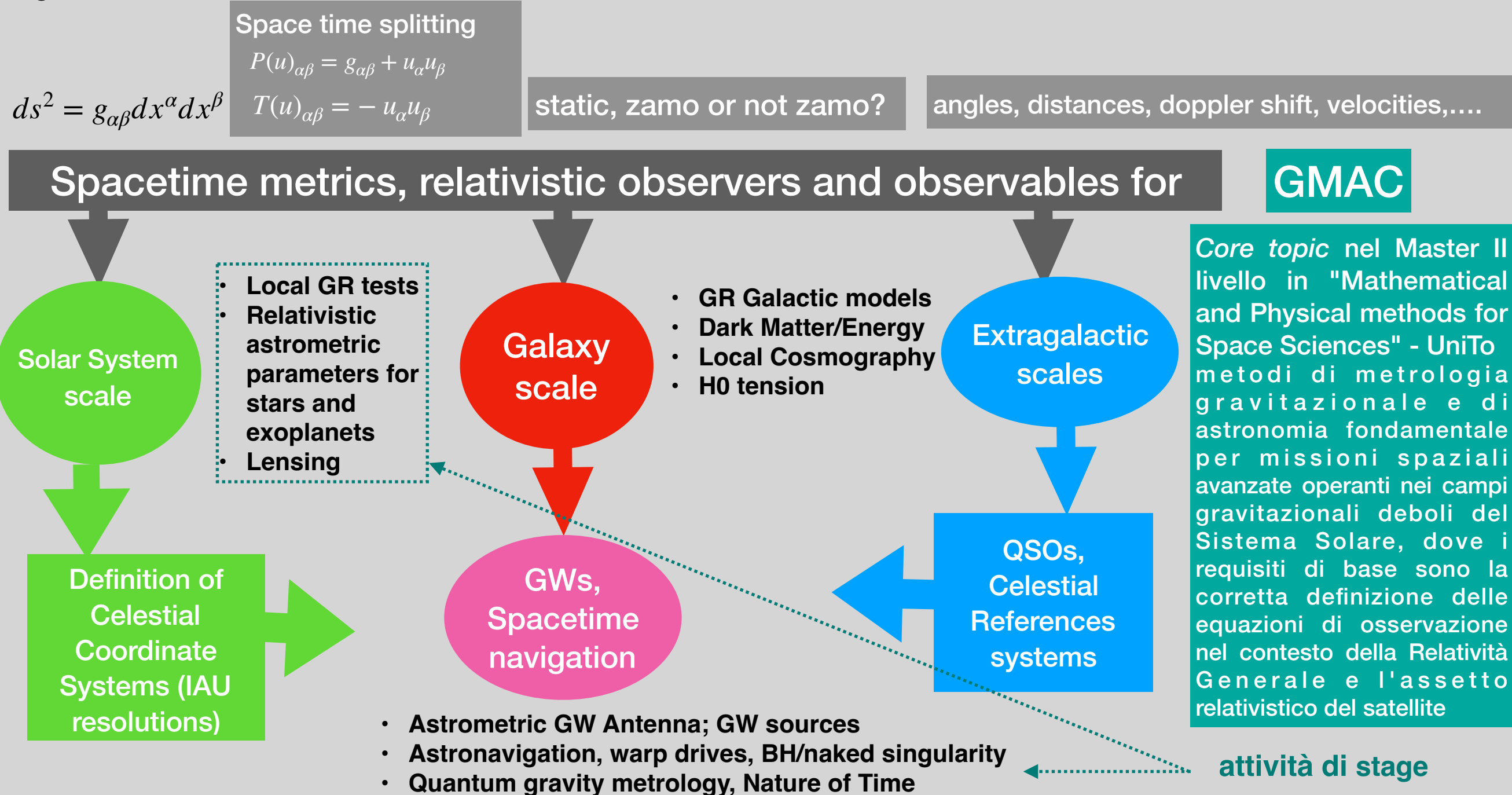
# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere



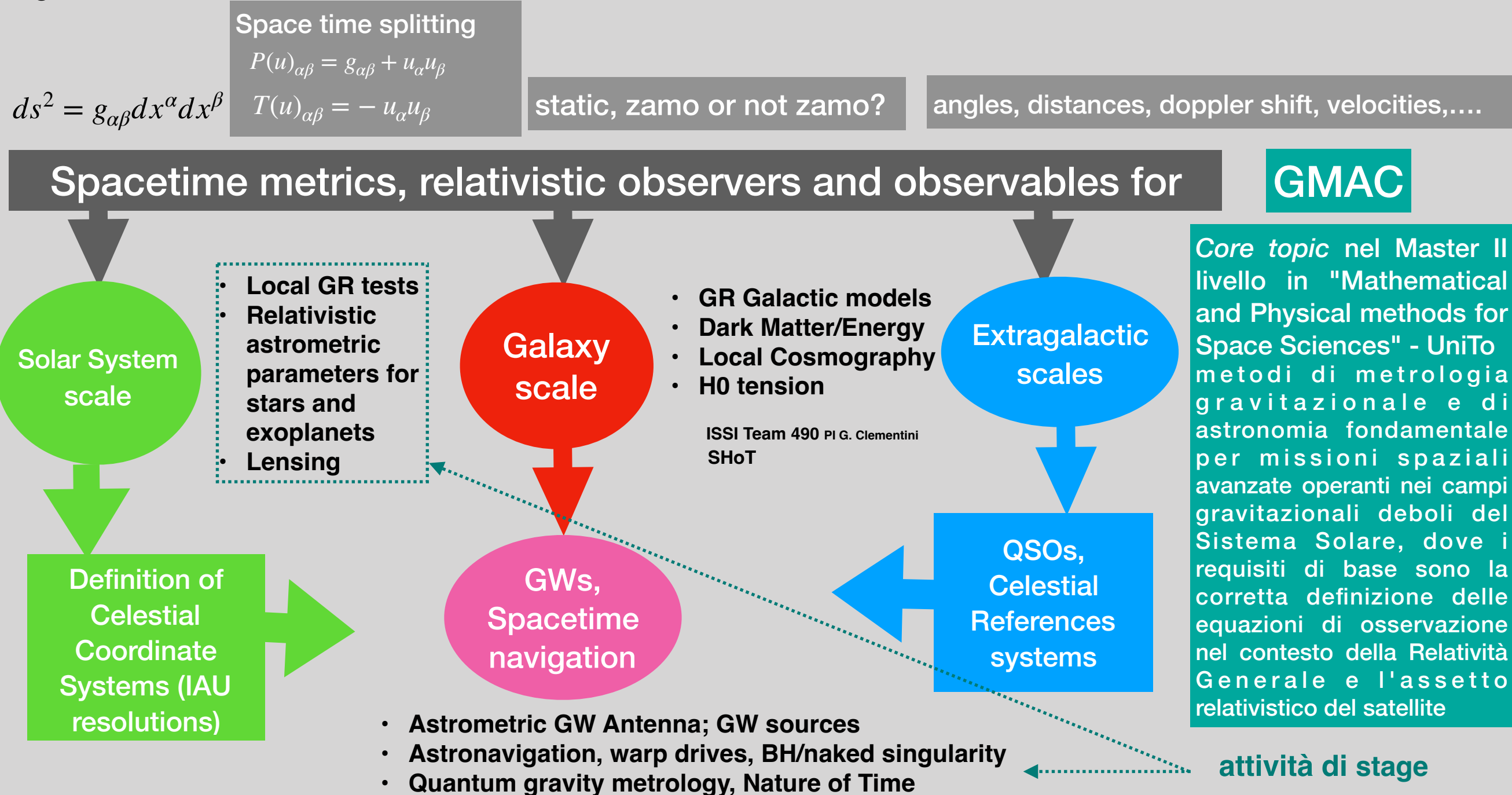
# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere



# Aspetti scientifici/tecnologici

"**Metrologia Gravitazionale&Astronomia**" = **Astronomia Gravitazionale** in un'accezione più ampia includente aspetti applicativi della teoria della misura in Relatività Generale, la teoria standard della gravità, a diverse scale  
Programma in itinere



1. Relativistic Astrometry beyond Gaia / 2. Galaxy GR models / 3. Astrometric GW Antenna/ 4. Spacetime astronavigation



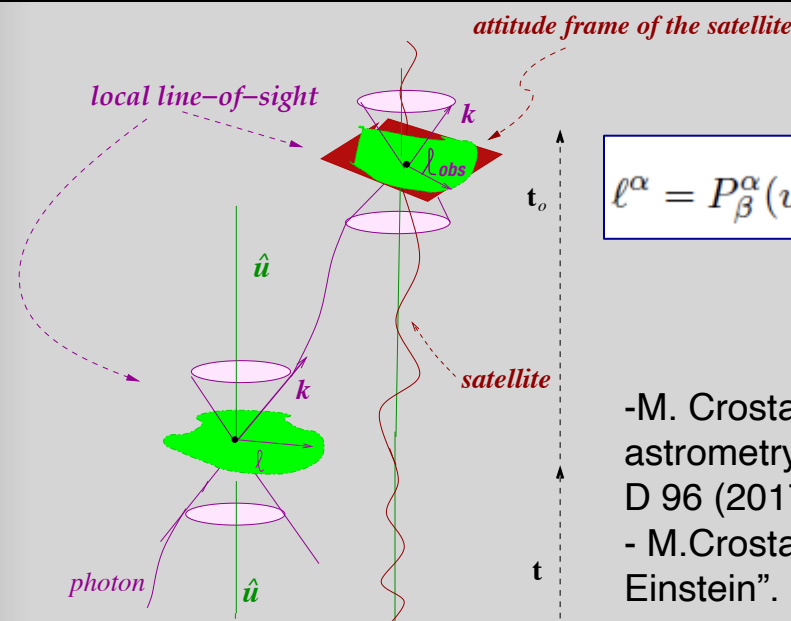
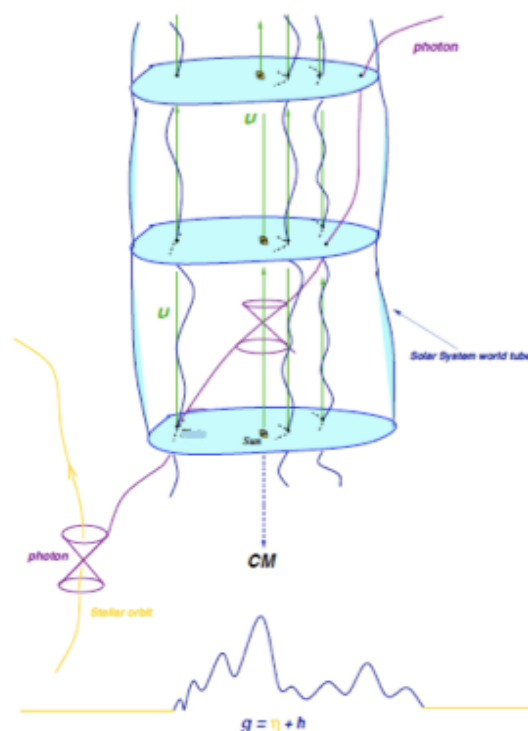
# 1. ASTROMETRIA RELATIVISTICA oltre Gaia

modelli teorici, analitici e/o numerici, completamente basati sulla Relatività Generale (RG) + assetto relativistico di osservatore satellitare o ground based) per dati astronomici sempre più accurati

Legacy da GaiaUniverse-0, GaiaUniverse-1

accuratezza micro-secondo d'arco  
+ campi gravitazionali dinamici =  
modelli relativistici per ricostruire la  
propagazione della luce,  
dall'osservatore alla stella

le traiettorie dei fotoni emessi dalle stelle  
- geodetiche nulle -  
stanno all'astronomia come i modelli degli interni  
stellari stanno all'evoluzione stellare



$$\ell^\alpha = P^\alpha_\beta(u) k^\beta(\tau)$$

RAMOD: modelli astrometrici di Relatività Generale con accuratezza intrinseca crescente, adattati a diversi osservatori, che interfacciano metodi di relatività numerica e analitica

-M. Crosta et al. "General relativist observable for gravitational astrometry in the context of the Gaia mission and beyond". Phys. Rev. D 96 (2017), p. 104030.

- M.Crosta. "Astrometry in the 21st century. From Hipparchus to Einstein". In: La Rivista del Nuovo Cimento 42 (2019).

## 2. LA GALASSIA RELATIVISTICA

applicazione consistente alla Relatività Generale dalle scale del Sistema Solare a quelle della Via Lattea,

Dalle geodetiche: proprietà geometriche, cinematiche e dinamiche degli oggetti celesti, inclusa la nostra **Galassia**; quest'ultima è assemblata e modellata dalla gravità e pertanto, **per consistenza, necessita di essere investigata applicando la RG** (allo stato dell'arte la teoria adottata è ancora newtoniana),

**laboratorio coerente per testare le predizioni dei modelli cosmologici a  $z=0$** , ovvero il prodotto dell'evoluzione cosmologica a differenti scale, dal Sistema Solare fino alla sua periferia

## 2. LA GALASSIA RELATIVISTICA

applicazione consistente alla Relatività Generale dalle scale del Sistema Solare a quelle della Via Lattea,

Dalle geodetiche: proprietà geometriche, cinematiche e dinamiche degli oggetti celesti, inclusa la nostra **Galassia**; quest'ultima è assemblata e modellata dalla gravità e pertanto, **per consistenza, necessita di essere investigata applicando la RG** (allo stato dell'arte la teoria adottata è ancora newtoniana),

**laboratorio coerente per testare le predizioni dei modelli cosmologici a  $z=0$** , ovvero il prodotto dell'evoluzione cosmologica a differenti scale, dal Sistema Solare fino alla sua periferia

### Regime di campo debole @Milky Way scale

In generale si assume che gli “effetti relativistici” nella Galassia siano “piccoli” quindi:

✓ trascurabili..

✓ e l'approssimazione Newtonian sia valida localmente..

## 2. LA GALASSIA RELATIVISTICA

applicazione consistente alla Relatività Generale dalle scale del Sistema Solare a quelle della Via Lattea,

Dalle geodetiche: proprietà geometriche, cinematiche e dinamiche degli oggetti celesti, inclusa la nostra **Galassia**; quest'ultima è assemblata e modellata dalla gravità e pertanto, **per consistenza, necessita di essere investigata applicando la RG** (allo stato dell'arte la teoria adottata è ancora newtoniana),

**laboratorio coerente per testare le predizioni dei modelli cosmologici a  $z=0$** , ovvero il prodotto dell'evoluzione cosmologica a differenti scale, dal Sistema Solare fino alla sua periferia

### Regime di campo debole @Milky Way scale

In generale si assume che gli “effetti relativistici” nella Galassia siano “piccoli” quindi:

✓ trascurabili..

✓ e l'approssimazione Newtonian sia valida localmente..



Il limite di piccola curvatura in RG coincide con il regime Newtoniano?

$v \ll c$  è un concetto di Relatività Speciale!

Correzioni nell'approssimazione post-Newtoniana

$$(v_{\text{Gal}}/c)^2 \sim 0,69 \times 10^{-6} \text{ (rad)} \sim 100 \text{ mas}$$

$$(v_{\text{Gal}}/c)^3 \sim 0,57 \times 10^{-9} \text{ (rad)} \sim 120 \mu\text{as!}$$



## 2. LA GALASSIA RELATIVISTICA

applicazione consistente alla Relatività Generale dalle scale del Sistema Solare a quelle della Via Lattea,

Dalle geodetiche: proprietà geometriche, cinematiche e dinamiche degli oggetti celesti, inclusa la nostra **Galassia**; quest'ultima è assemblata e modellata dalla gravità e pertanto, **per consistenza, necessita di essere investigata applicando la RG** (allo stato dell'arte la teoria adottata è ancora newtoniana),

**laboratorio coerente per testare le predizioni dei modelli cosmologici a  $z=0$** , ovvero il prodotto dell'evoluzione cosmologica a differenti scale, dal Sistema Solare fino alla sua periferia

### Regime di campo debole @Milky Way scale

In generale si assume che gli “effetti relativistici” nella Galassia siano “piccoli” quindi:

✓ trascurabili..

✓ e l'approssimazione Newtonian sia valida localmente..



Il limite di piccola curvatura in RG coincide con il regime Newtoniano?

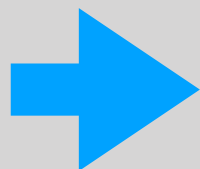
$v \ll c$  è un concetto di Relatività Speciale!

Correzioni nell'approssimazione post-Newtoniana

$$(v_{\text{Gal}}/c)^2 \sim 0,69 \times 10^{-6} \text{ (rad)} \sim 100 \text{ mas}$$

$$(v_{\text{Gal}}/c)^3 \sim 0,57 \times 10^{-9} \text{ (rad)} \sim 120 \mu\text{as!}$$

Necessità di confrontare modelli della Relatività Generale e modelli classici (Lambda)-CDM



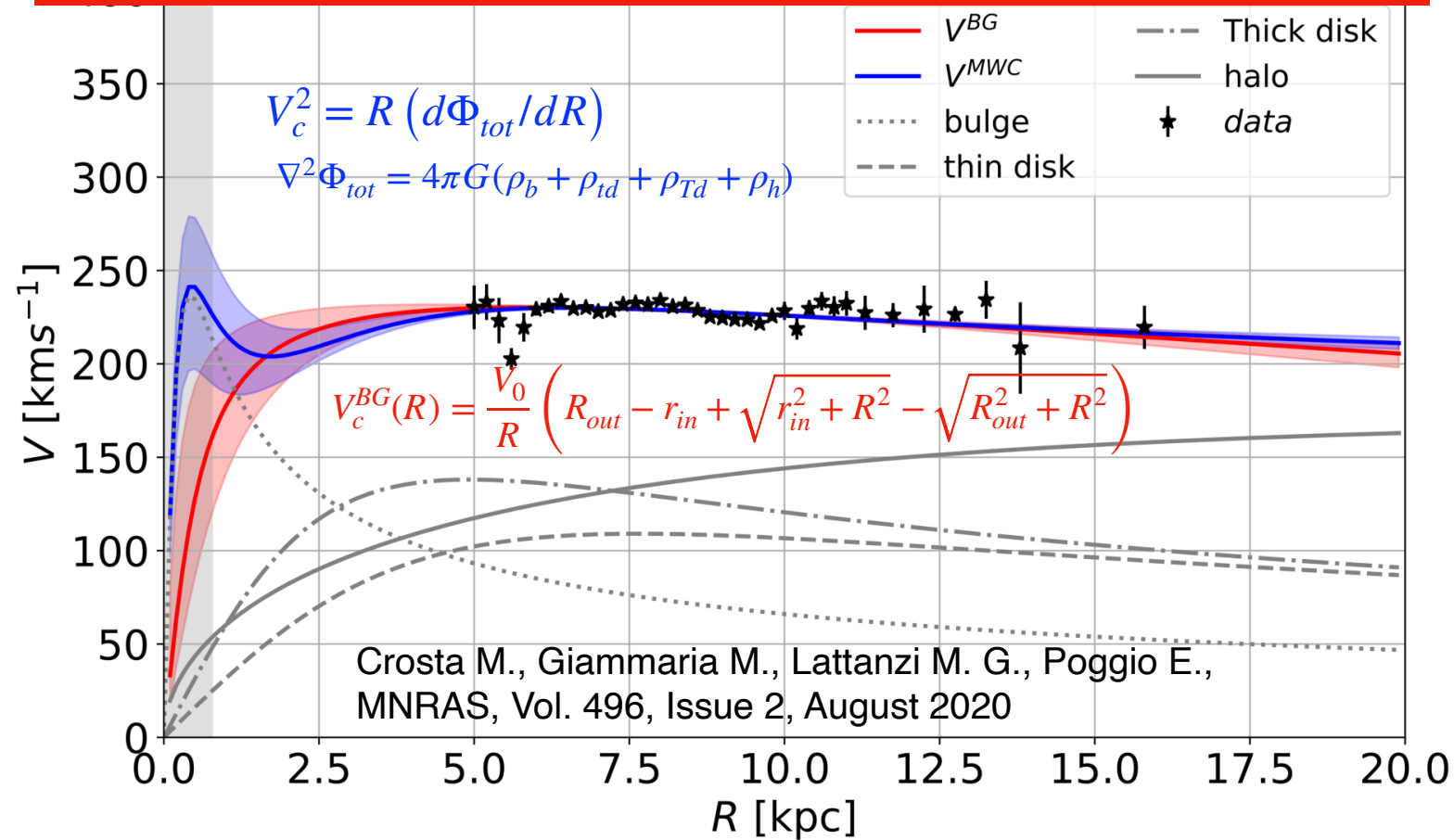
la curva di rotazione della MW come primo test per la Galassia Relativistica

# MCMC fit basato sui dati DR2 (campione omogeneo di circa 6000 early type stars)

5277 **early-type stars** e **325 classical type I Cepheids** con  
parallax/sigma\_parallax > 5  
RV/sigma\_RV > 5 dalla Gaia DR2

[https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow\\_20200716](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20200716)

profili di velocità: classica (MWC, blu) / relativistica (BG, rosso)



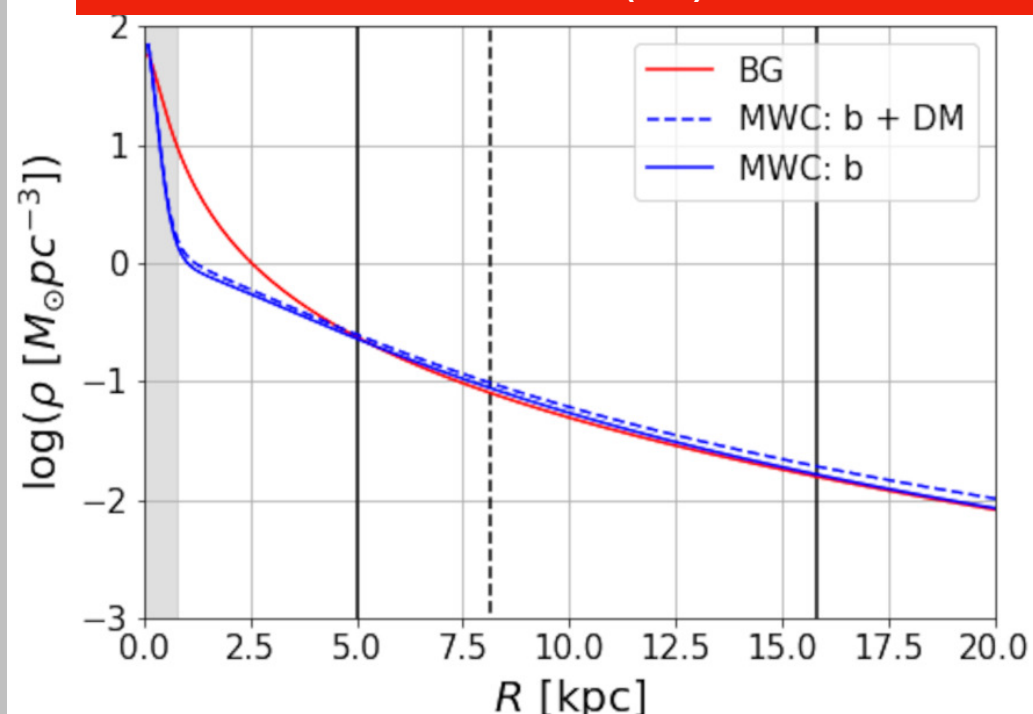
Galactic metric-disk

$$ds^2 = -M^2 dt^2 + (r^2 - N^2)(d\phi + M^\phi dt)^2 + e^\nu(dr^2 + dz^2)$$

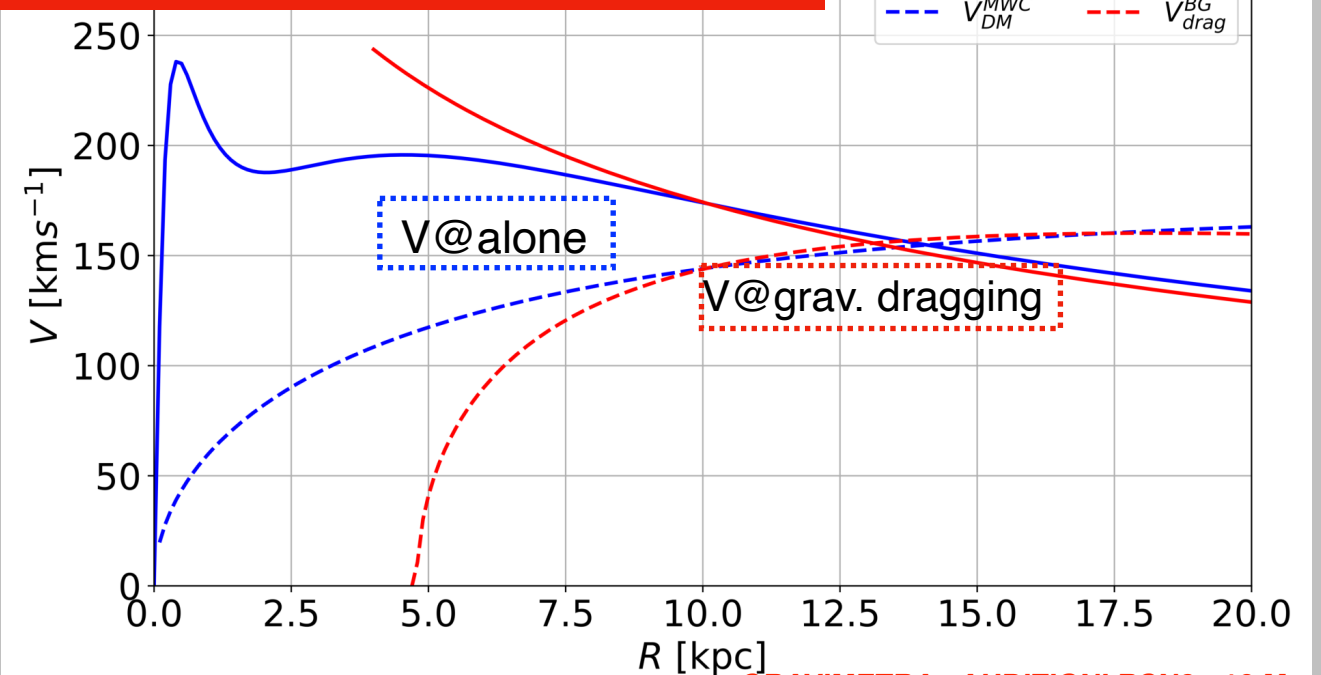
$$v^{\hat{\phi}} = \frac{\sqrt{g_{\phi\phi}}}{M}(\Omega + M^\phi)$$

velocità misurata relativistica  
rispetto ad oss.localmente  
non rotanti  $\propto g_{0\phi}$

Profilo di densità barionica relativistica (rosso)/  
classica (blu)



Velocità dovute a: gravitational dragging(rosso) /  
componente di alone alone (blu)

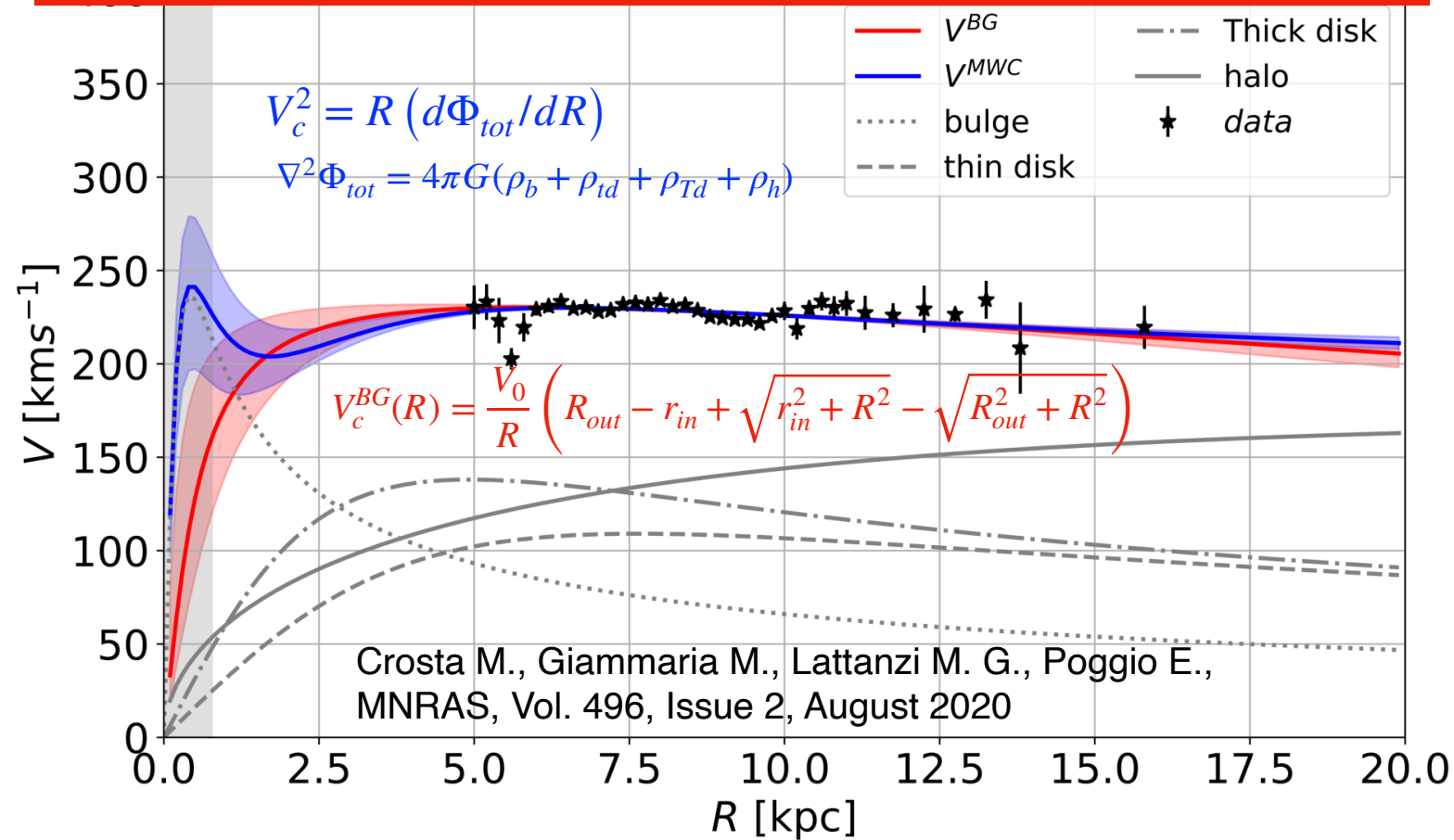


# MCMC fit basato sui dati DR2 (campione omogeneo di circa 6000 early type stars)

5277 **early-type stars** e **325 classical type I Cepheids** con  
parallax/sigma\_parallax > 5  
RV/sigma\_RV > 5 dalla Gaia DR2

[https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow\\_20200716](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20200716)

profili di velocità: classica (MWC, blu) / relativistica (BG, rosso)



Galactic metric-disk

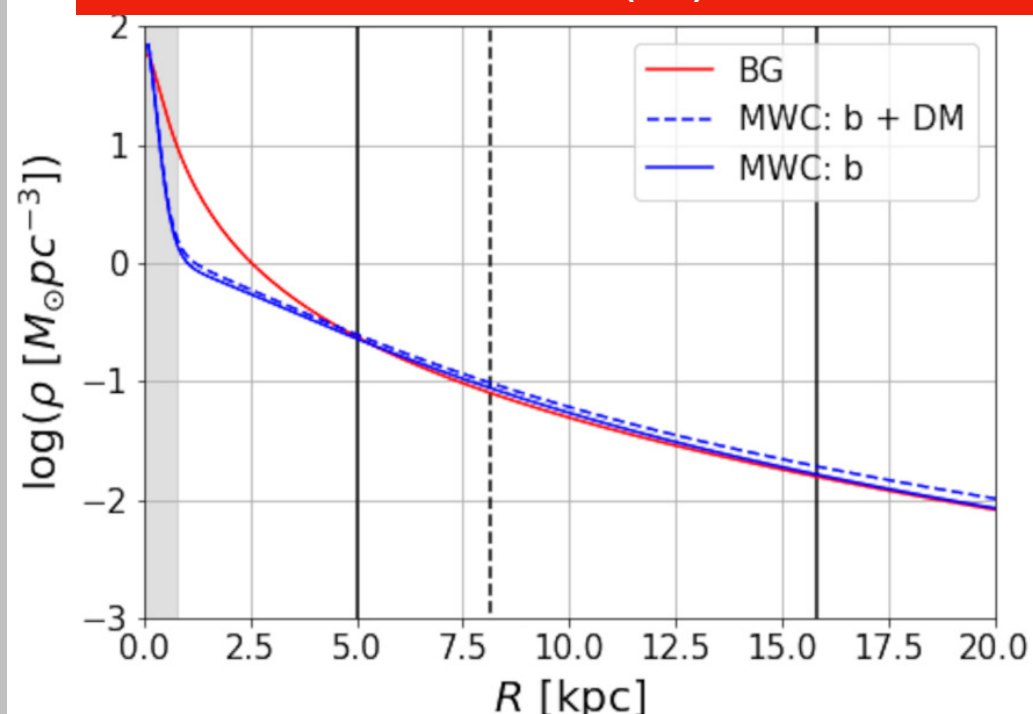
$$ds^2 = -M^2 dt^2 + (r^2 - N^2)(d\phi + M^\phi dt)^2 + e^\nu(dr^2 + dz^2)$$

$$v^{\hat{\phi}} = \frac{\sqrt{g_{\phi\phi}}}{M} (\Omega + \Lambda^{\phi})$$

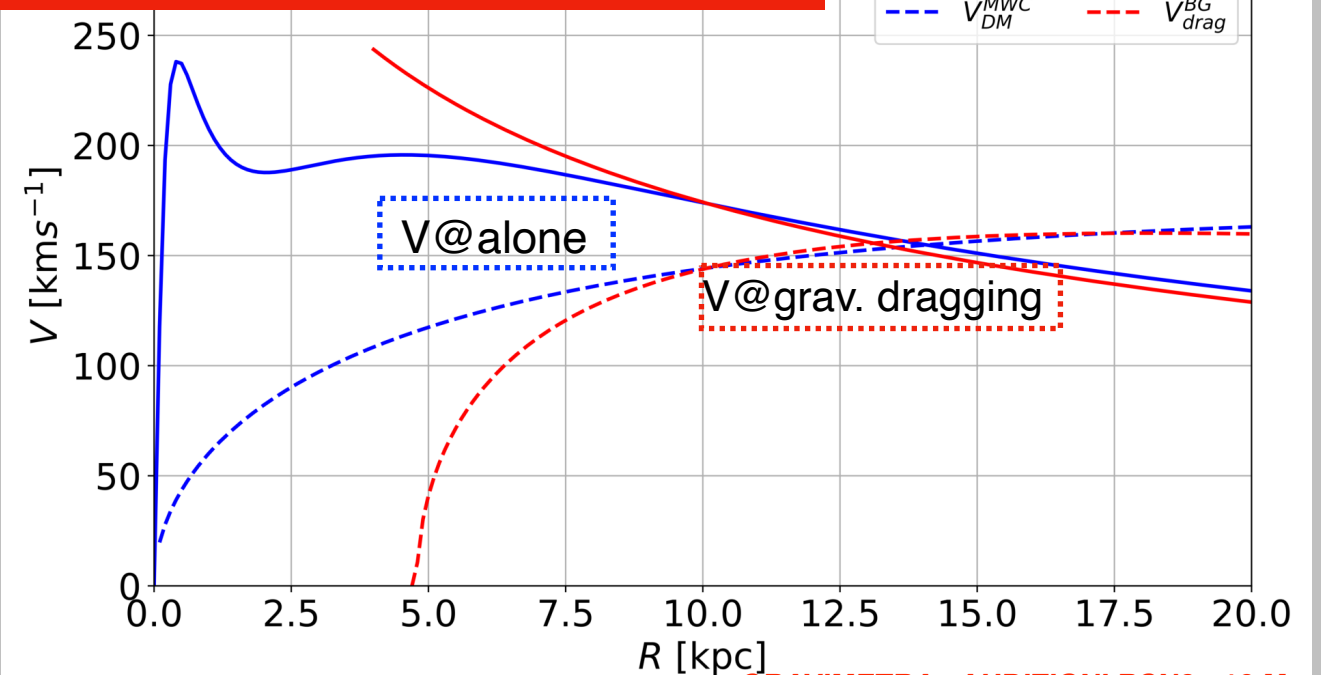
velocità newtoniana

velocità misurata relativistica  
rispetto ad oss.localmente  
non rotanti  $\propto g_{0\phi}$

Profilo di densità barionica relativistica (rosso)/  
classica (blu)



Velocità dovute a: gravitational dragging(rosso) /  
componente di alone alone (blu)



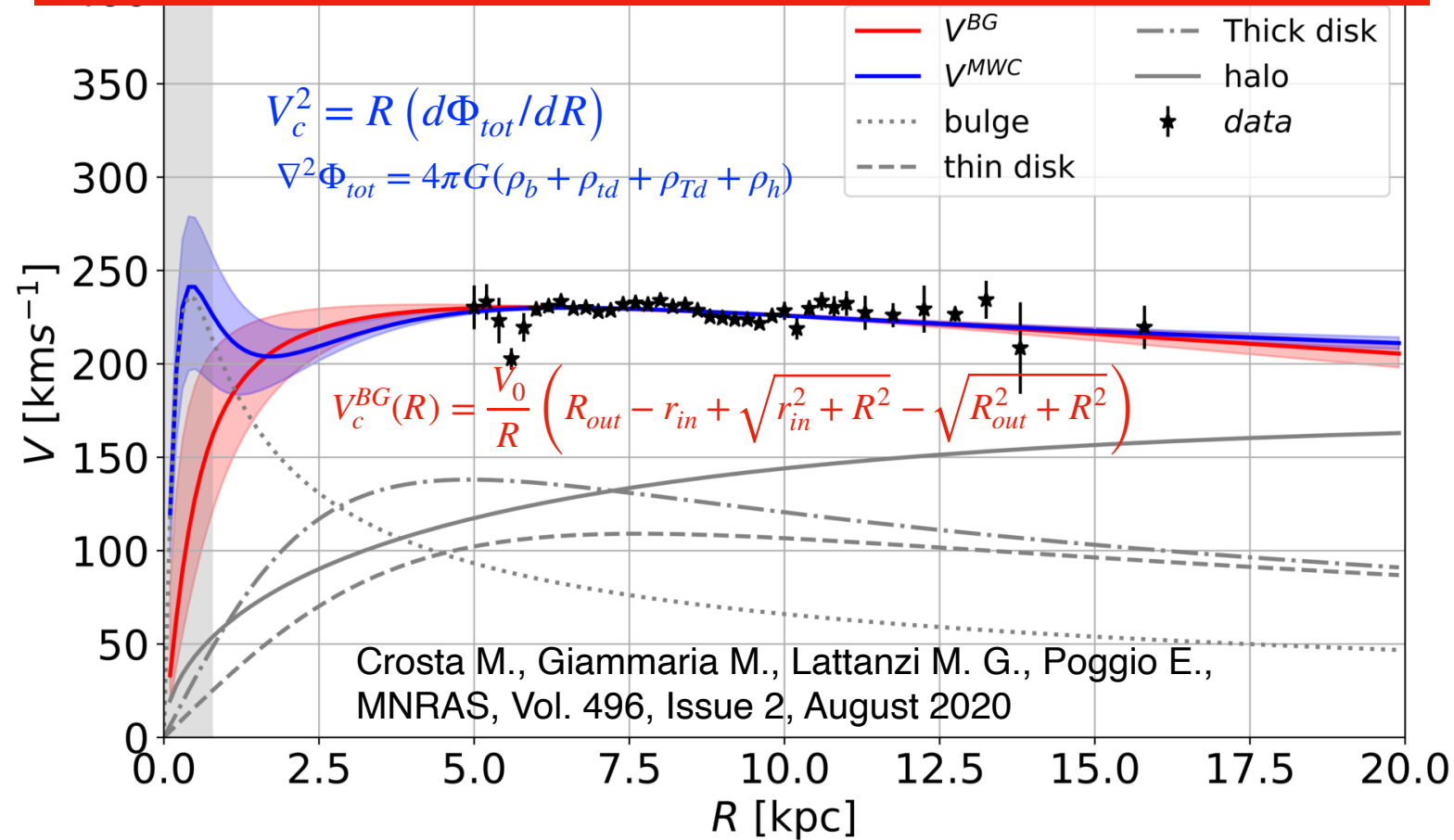


# MCMC fit basato sui dati DR2 (campione omogeneo di circa 6000 early type stars)

5277 **early-type stars** e **325 classical type I Cepheids** con  
parallax/sigma\_parallax > 5  
RV/sigma\_RV > 5 dalla Gaia DR2

[https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow\\_20200716](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20200716)

profili di velocità: classica (MWC, blu) / relativistica (BG, rosso)



Galactic metric-disk

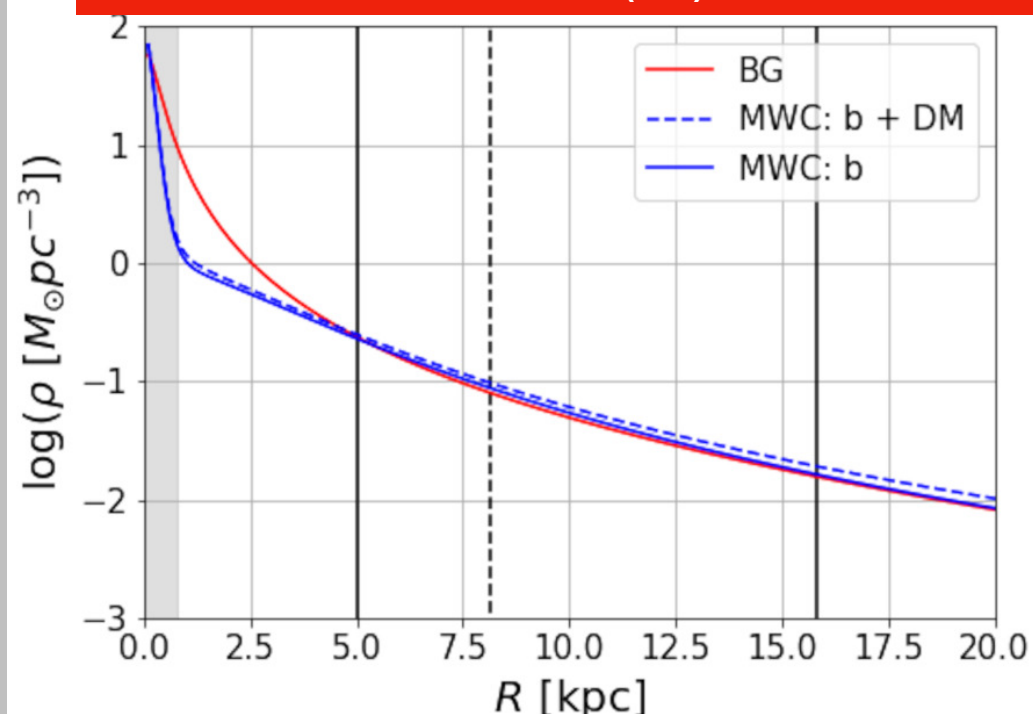
$$ds^2 = -M^2 dt^2 + (r^2 - N^2)(d\phi + M^\phi dt)^2 + e^\nu(dr^2 + dz^2)$$

$$v^{\hat{\phi}} = \frac{\sqrt{g_{\phi\phi}}}{M} (\Omega + M^\phi)$$

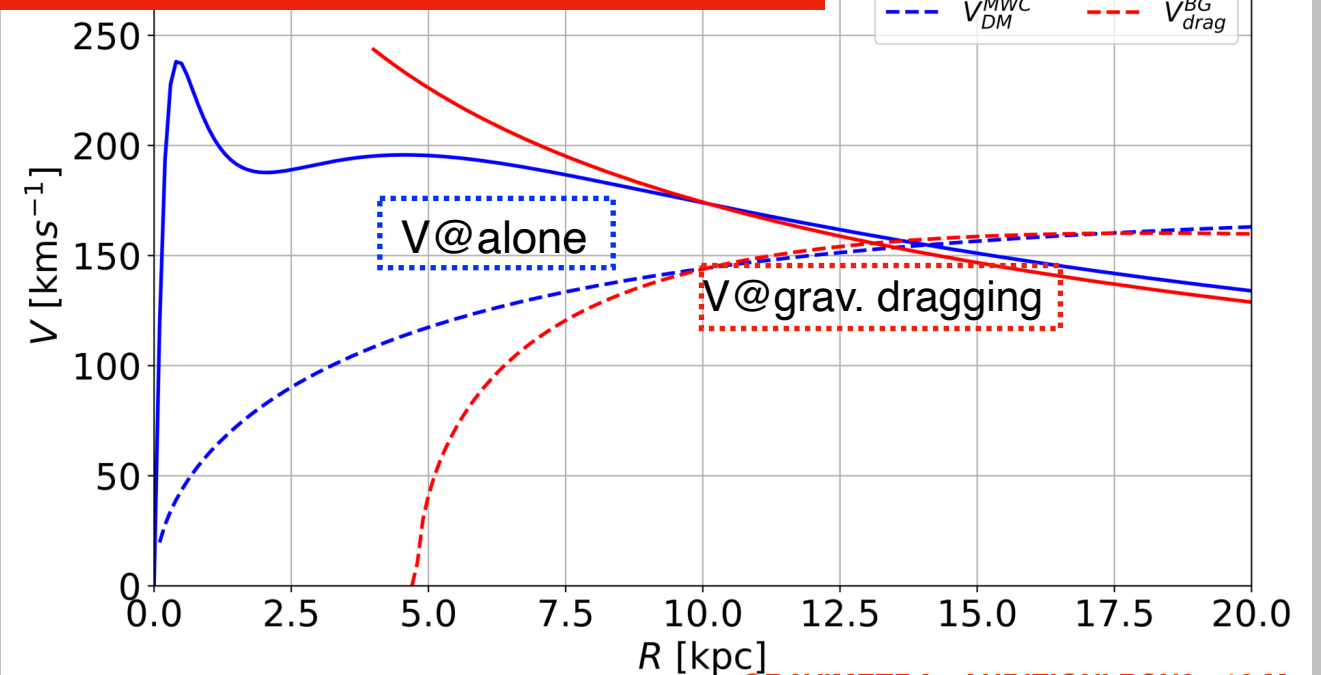
velocità newtoniana

velocità misurata relativistica  
rispetto ad oss.localmente  
non rotanti  $\propto g_{0\phi}$

Profilo di densità barionica relativistica (rosso)/  
classica (blu)



Velocità dovute a: gravitational dragging(rosso) /  
componente di alone alone (blu)

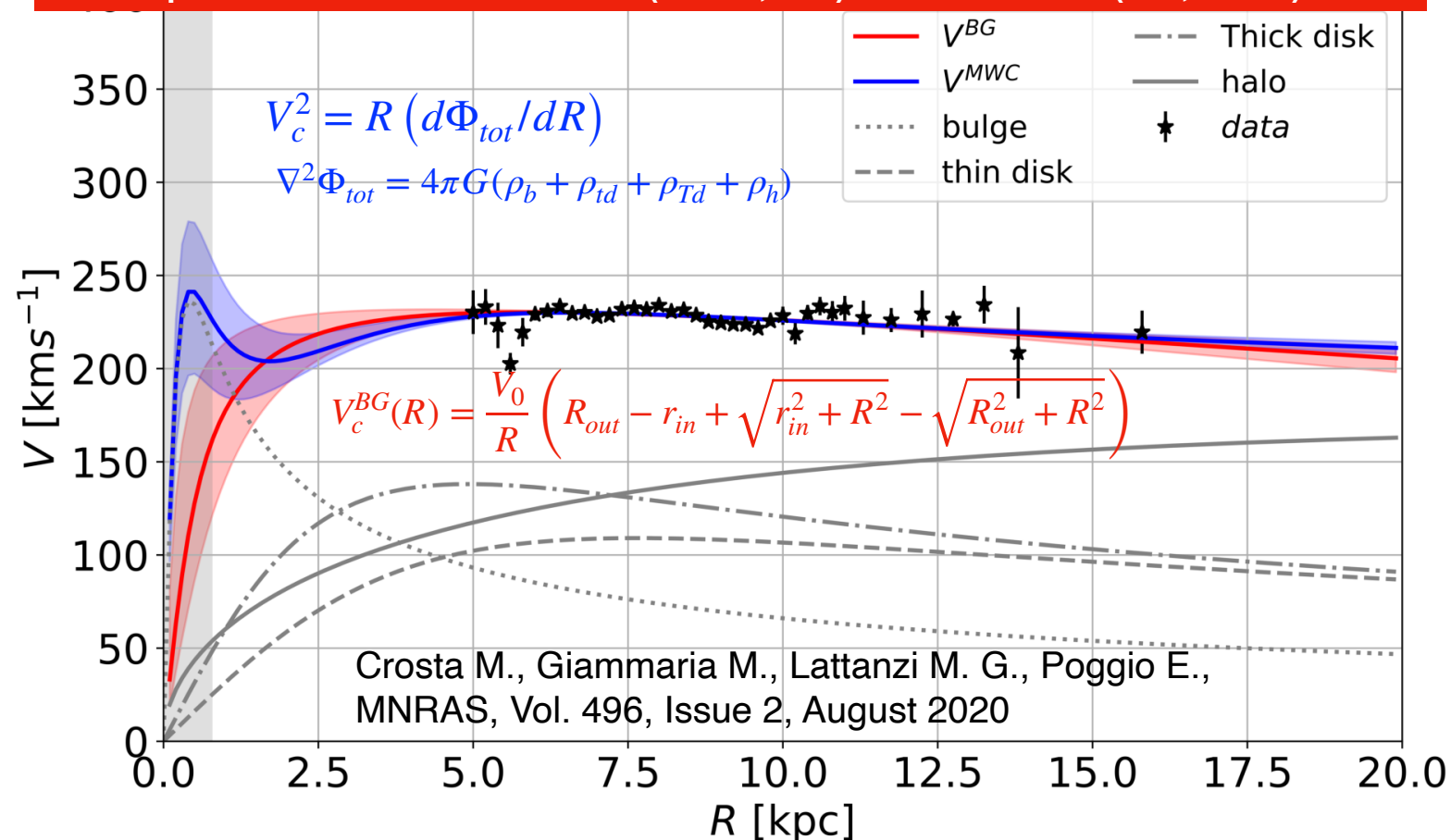


# MCMC fit basato sui dati DR2 (campione omogeneo di circa 6000 early type stars)

5277 **early-type stars** e **325 classical type I Cepheids** con  
parallax/sigma\_parallax > 5  
RV/sigma\_RV > 5 dalla Gaia DR2

[https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow\\_20200716](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20200716)

profili di velocità: classica (MWC, blu) / relativistica (BG, rosso)



Galactic metric-disk

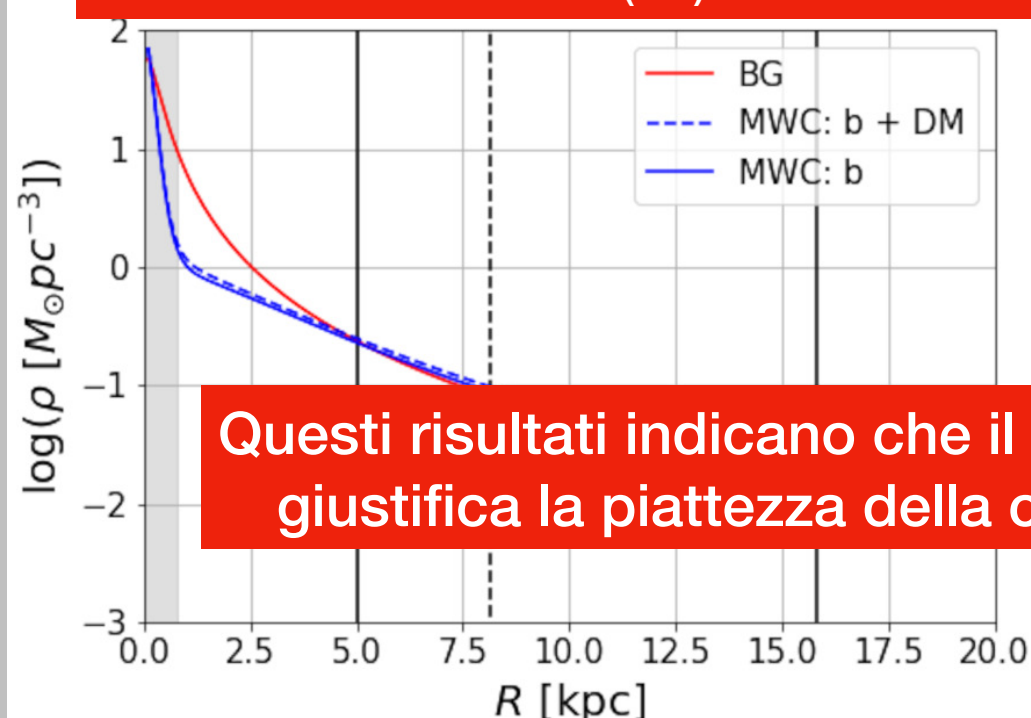
$$ds^2 = -M^2 dt^2 + (r^2 - N^2)(d\phi + M^\phi dt)^2 + e^\nu(dr^2 + dz^2)$$

$$v^{\hat{\phi}} = \frac{\sqrt{g_{\phi\phi}}}{M} (\Omega + M^\phi)$$

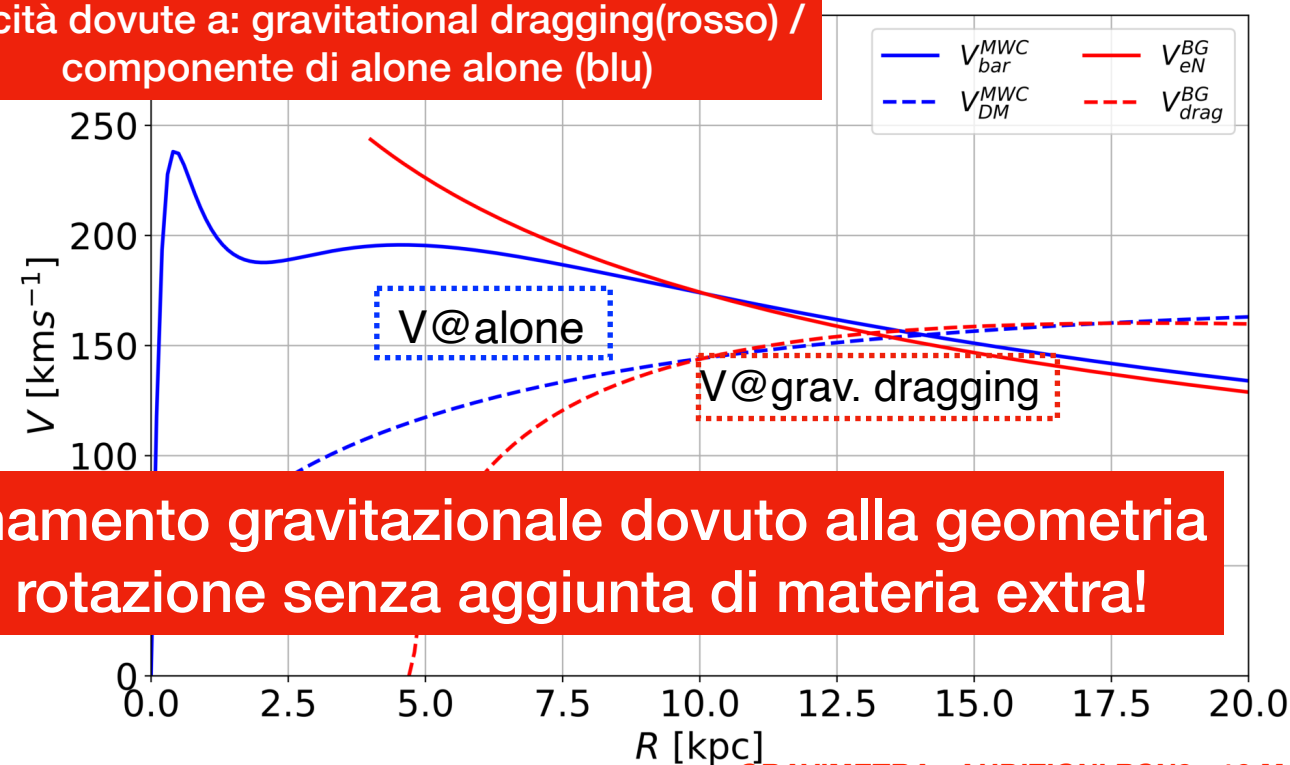
velocità newtoniana

velocità misurata relativistica  
rispetto ad oss.localmente  
non rotanti  $\propto g_{0\phi}$

Profilo di densità barionica relativistica (rosso)/  
classica (blu)



Velocità dovute a: gravitational dragging(rosso) /  
componente di alone alone (blu)



Questi risultati indicano che il trascinamento gravitazionale dovuto alla geometria  
giustifica la piatezza della curva di rotazione senza aggiunta di materia extra!





# Sviluppi

Ogni galassia possiede la propria curva di rotazione

Ogni galassia possiede la propria curva di rotazione

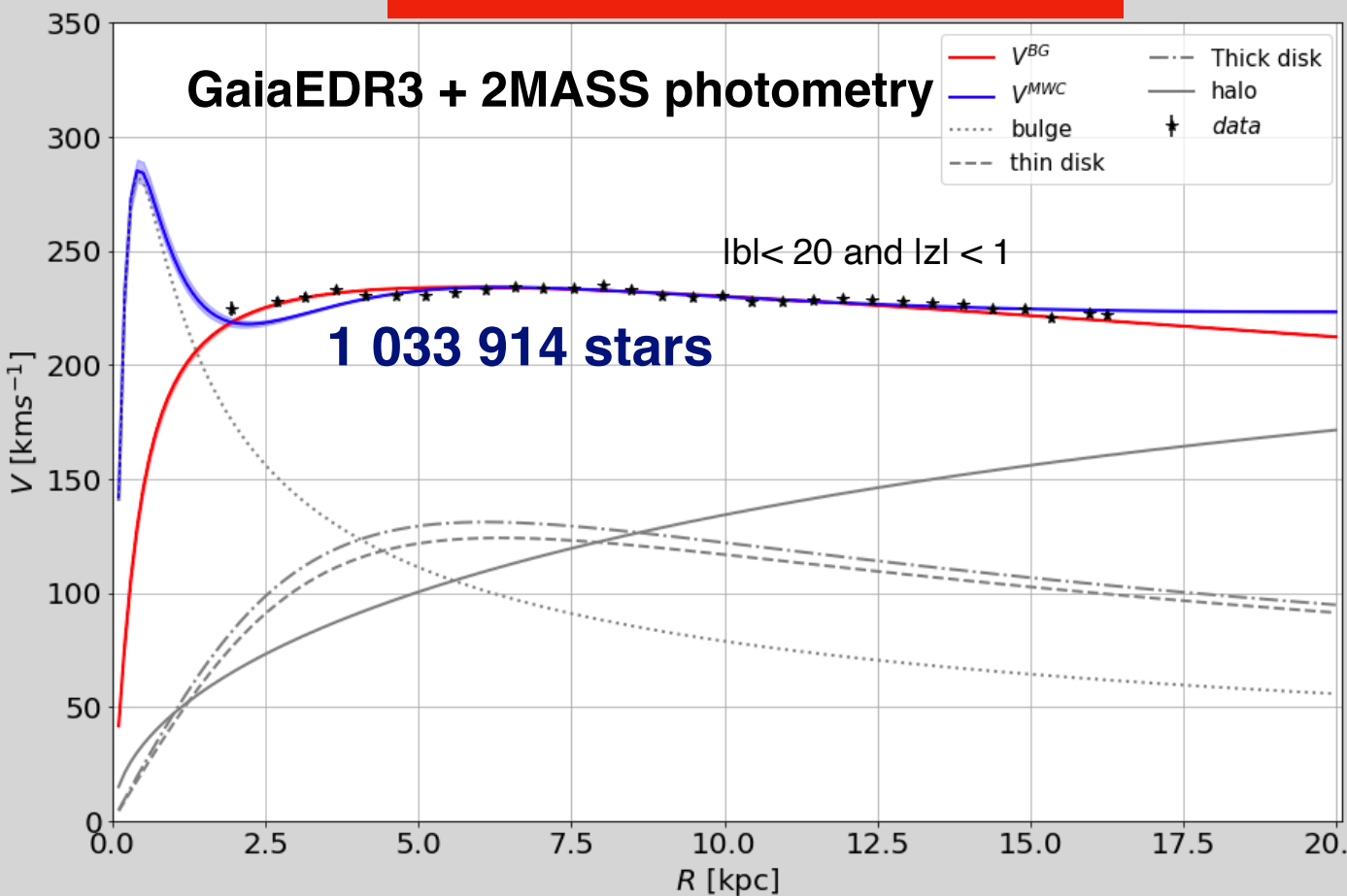
**Con metriche e soluzioni matematiche adeguate per le varie componenti, la “geometria” della Galassia può svolgere un ruolo di riferimento per altre galassie, proprio come il Sole per i modelli stellari**

# Sviluppi

Ogni galassia possiede la propria curva di rotazione

Con metriche e soluzioni matematiche adeguate per le varie componenti, la “geometria” della Galassia può svolgere un ruolo di riferimento per altre galassie, proprio come il Sole per i modelli stellari

## Estensione alla EDR3

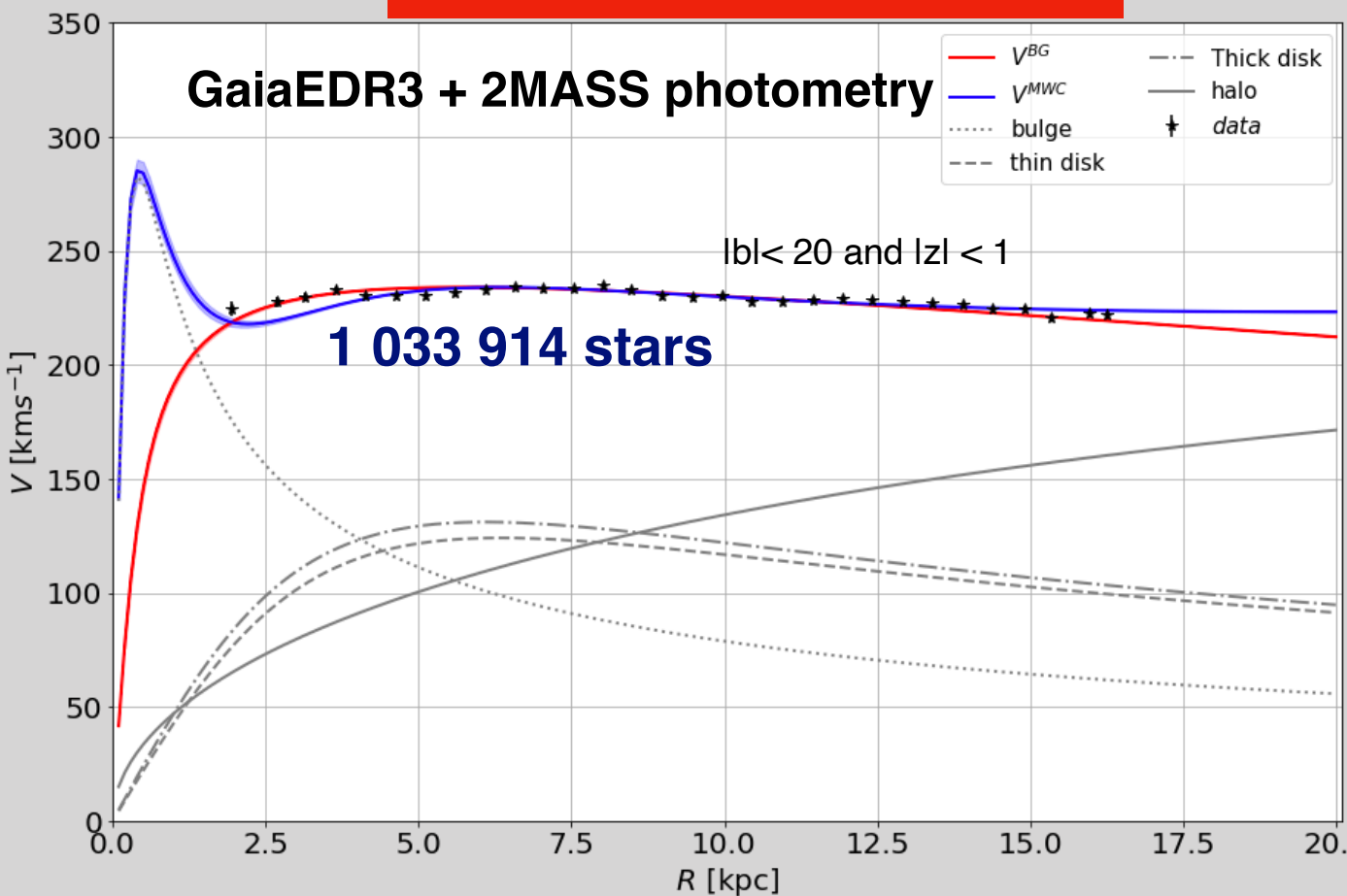


# Sviluppi

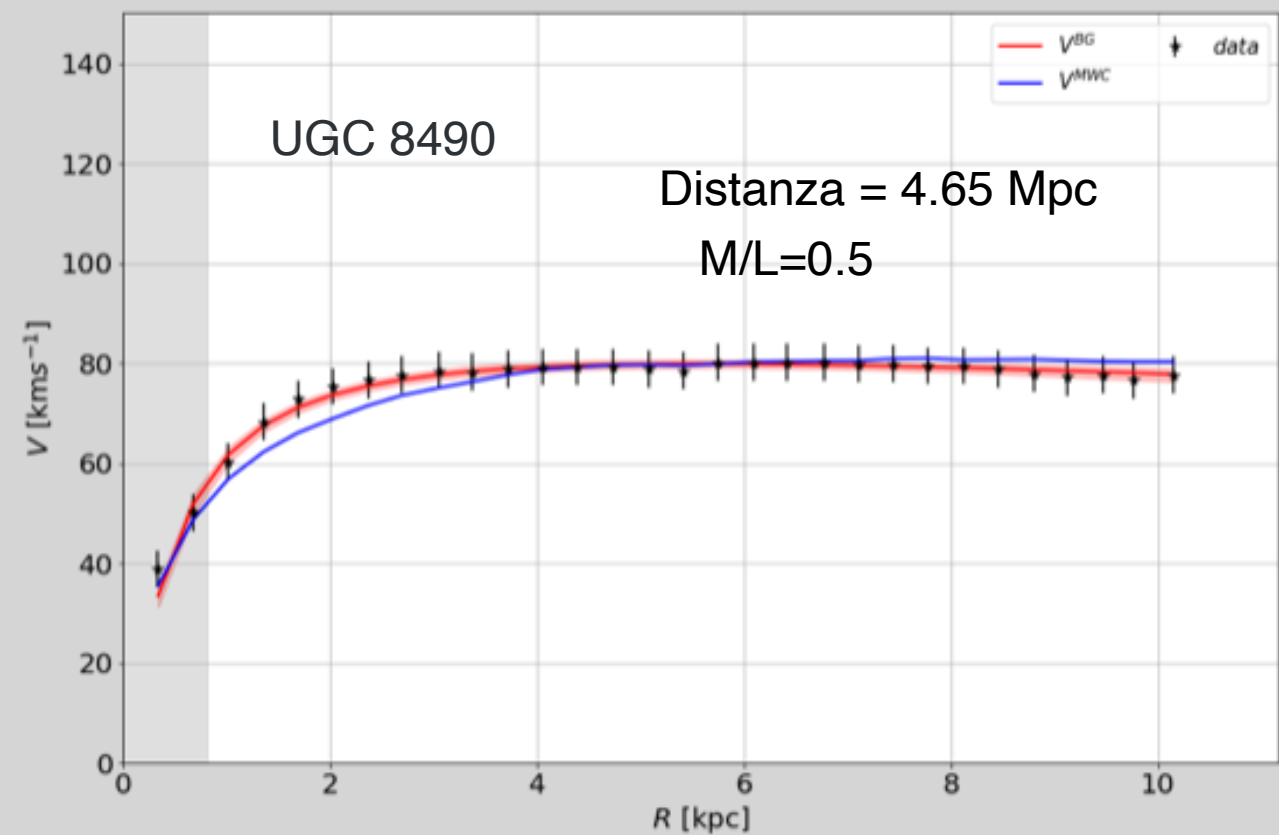
Ogni galassia possiede la propria curva di rotazione

Con metriche e soluzioni matematiche adeguate per le varie componenti, la “geometria” della Galassia può svolgere un ruolo di riferimento per altre galassie, proprio come il Sole per i modelli stellari

## Estensione alla EDR3



## Estensione alle galassie esterne

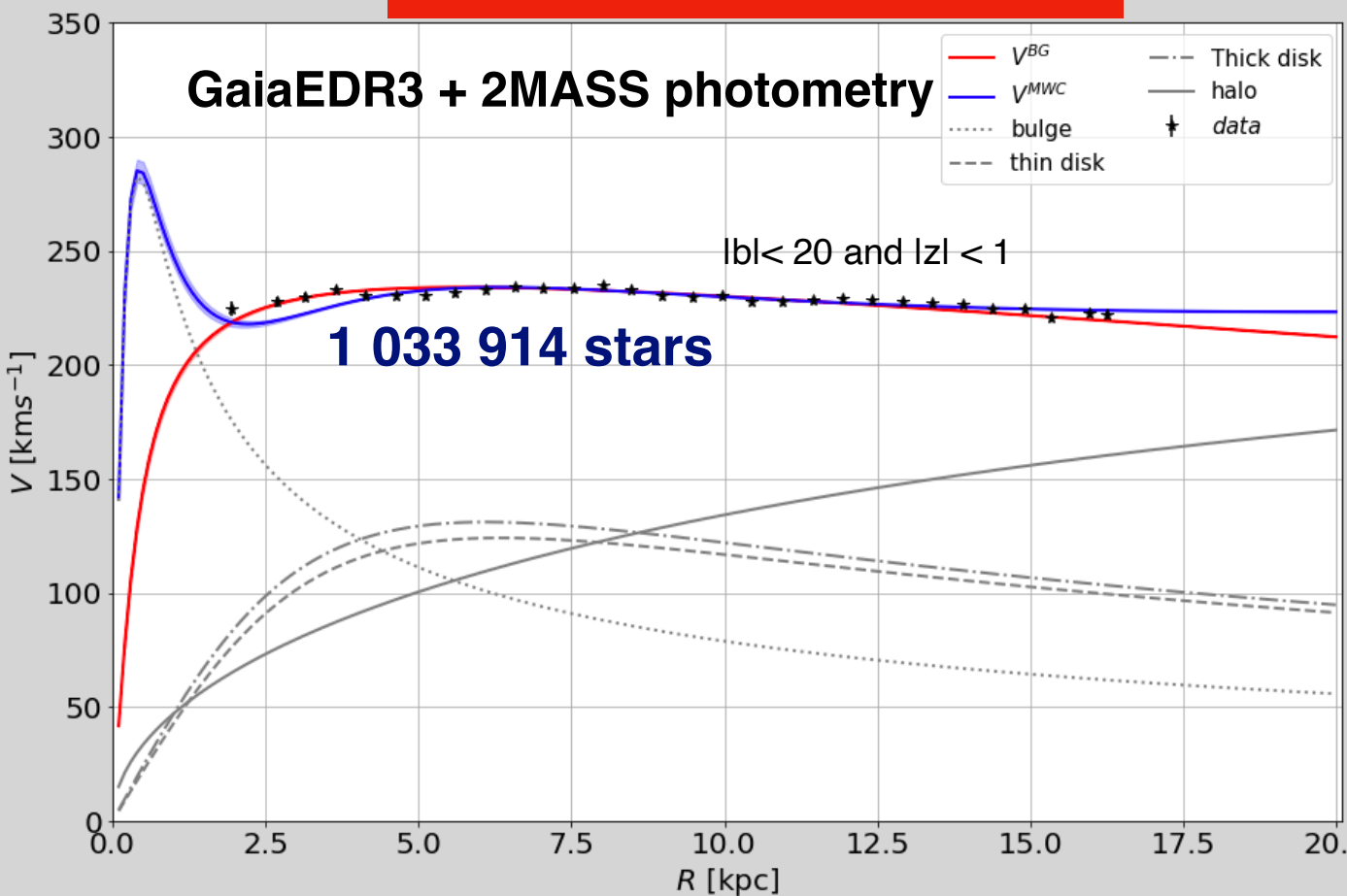


# Sviluppi

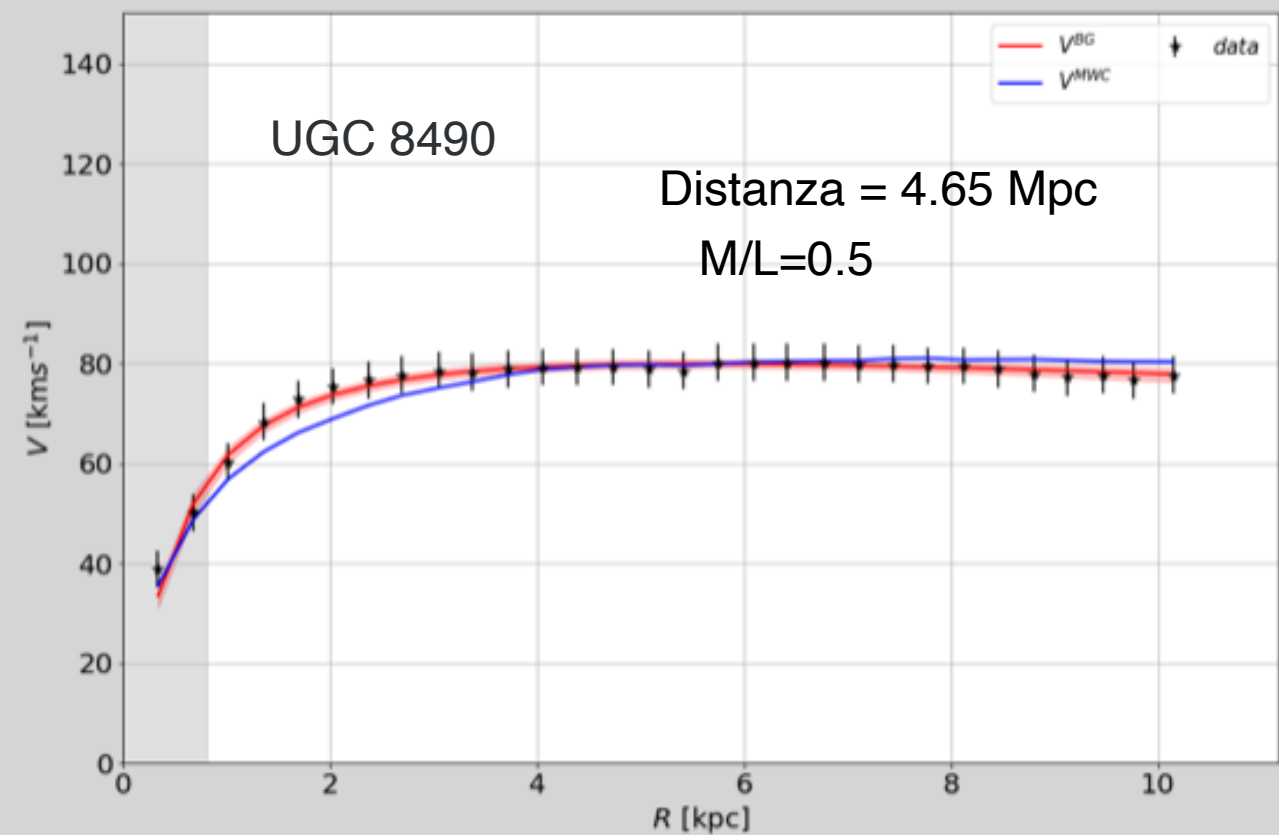
Ogni galassia possiede la propria curva di rotazione

Con metriche e soluzioni matematiche adeguate per le varie componenti, la “geometria” della Galassia può svolgere un ruolo di riferimento per altre galassie, proprio come il Sole per i modelli stellari

## Estensione alla EDR3



## Estensione alle galassie esterne



Next DR3! +



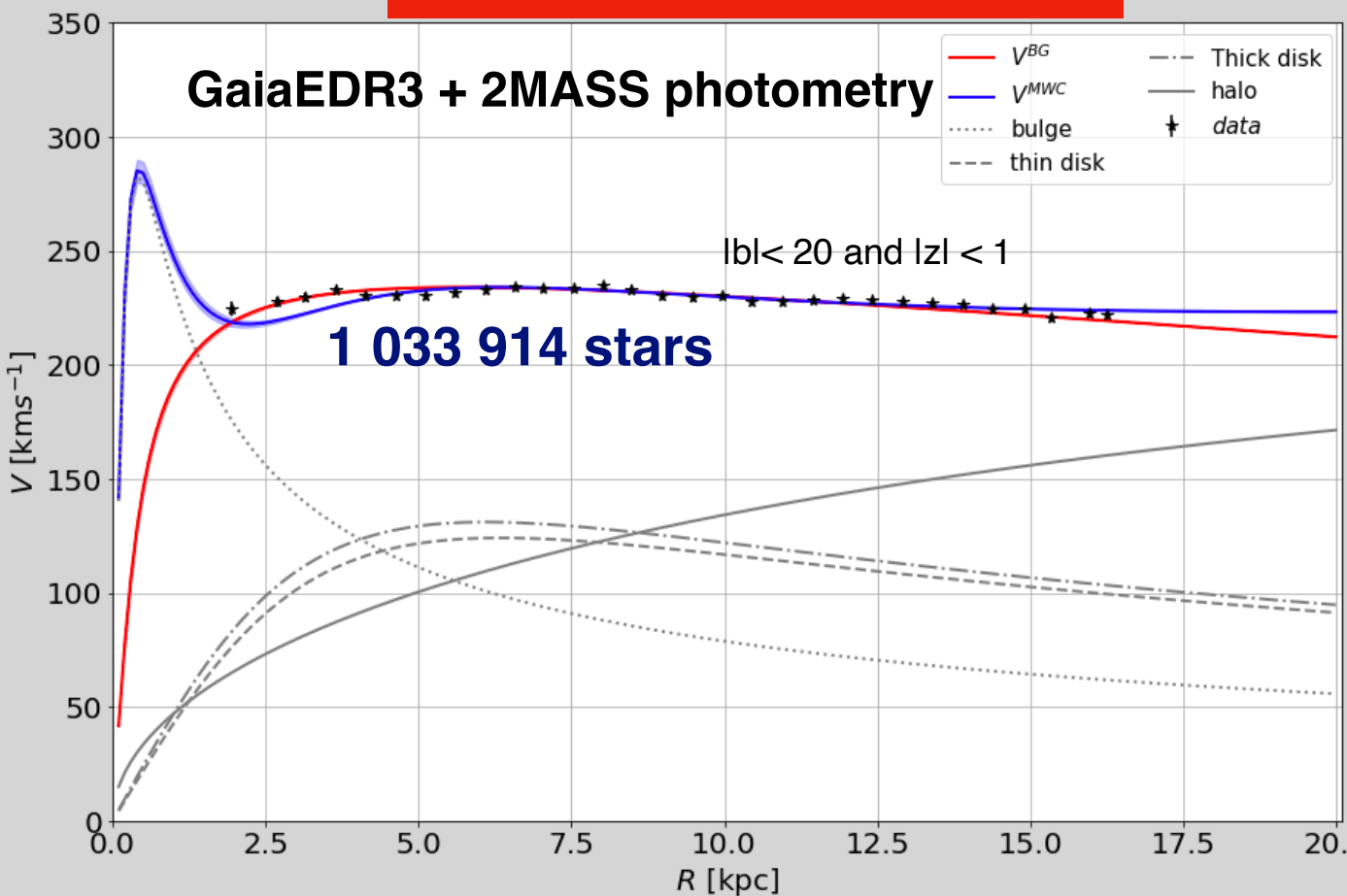


# Sviluppi

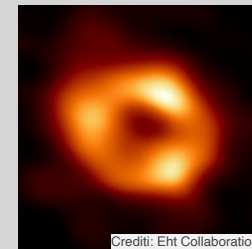
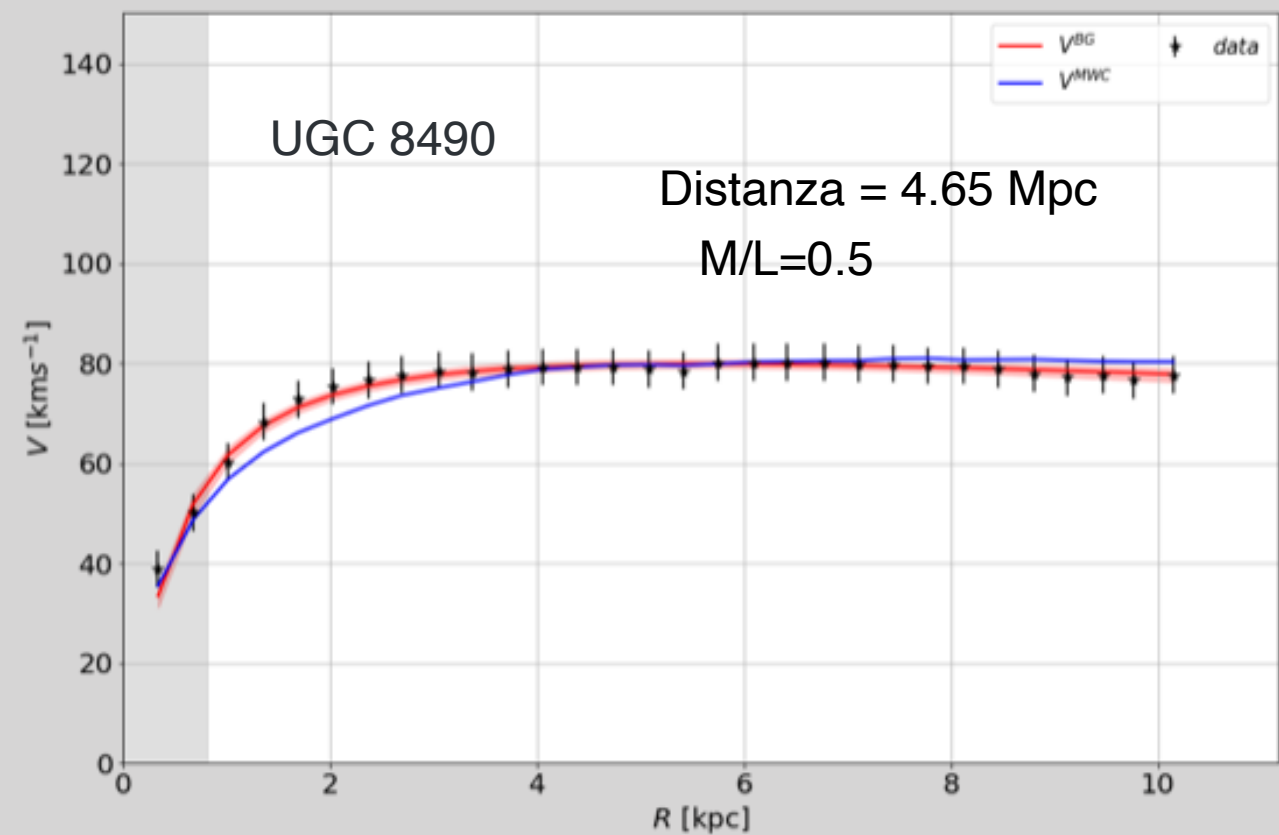
Ogni galassia possiede la propria curva di rotazione

Con metriche e soluzioni matematiche adeguate per le varie componenti, la “geometria” della Galassia può svolgere un ruolo di riferimento per altre galassie, proprio come il Sole per i modelli stellari

## Estensione alla EDR3



## Estensione alle galassie esterne



**Next DR3! +**

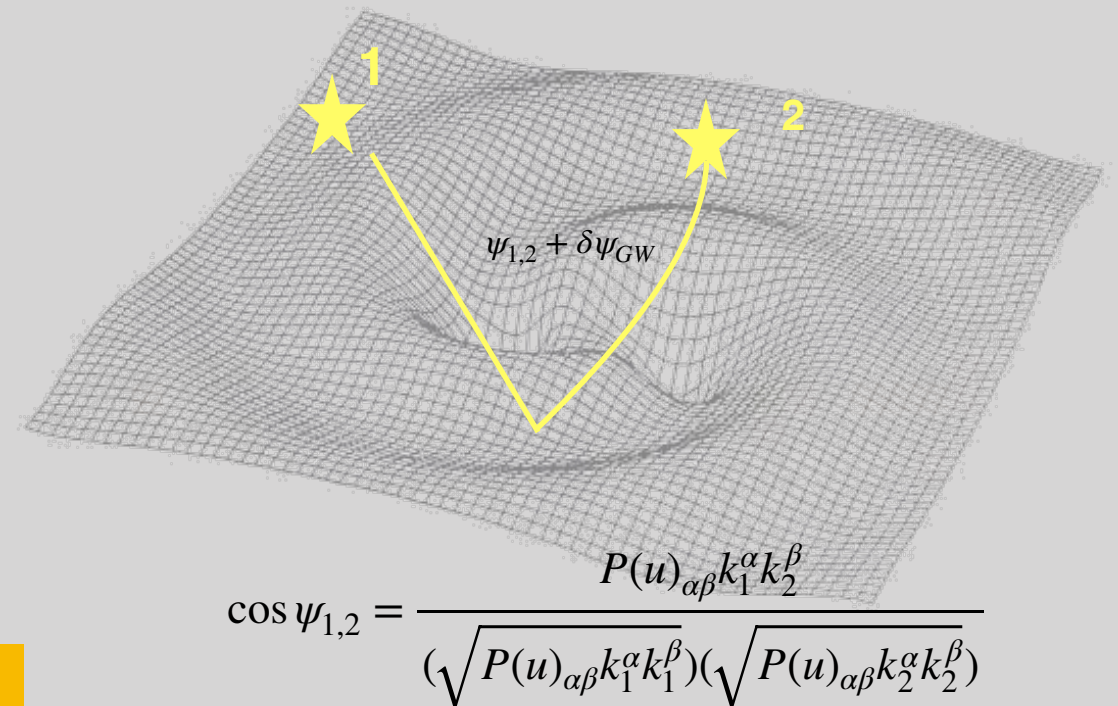
Dottorati:

- XXXIII, Milky Way simulations and tests with Gaia-DR2 in the context of Local Cosmology and Relativistic Astrometry (M.Giammaria, tutor M.Crosta-M.G. Lattanzi )
- XXXVII, Gravitational Astrometry & Fundamental Physics to test the dynamical evolution of our Galaxy and its place in cosmology(W.Beordo, tutor M.Crosta-M.G. Lattanzi )

# 3. ASTROGRAWANT

## ASTROmetric GRAvitational Wave ANTenna

- AstroGraWAnt utilizza coppie di sorgenti stellari vicine come "bracci" naturali di un' antenna che registra le variazioni nella loro separazione angolare indotte dal passaggio delle onde gravitazionali (GW);
- formulazione completamente differenziale dell'osservabile astrometrico



Nuova osservabile per le GW

$$\delta\hat{\psi}_{1,2}^{GW}(t_i) = - \frac{\eta_{\alpha\beta}(\bar{\ell}_{10}^\alpha \delta\ell_{20}^\beta + \bar{\ell}_{20}^\alpha \delta\ell_{10}^\beta)_{obs} + h_{\alpha\beta}^{GW} \bar{\ell}_{10}^\alpha \bar{\ell}_{20}^\beta}{\sin(\psi_{1,2}^{SS})} + O(h^2)$$

unperturbed star direction

extra-shift due to a passing GW

Telescope optical resolution

GW Strain

M.Crosta, Rivista del Nuovo Cimento 42, 10 (2019)

M.Crosta, M.G. Lattanzi, C. Leponcin-Lafitte, M. Gai, Q. Zhaoxiang, A. Vecchiato, *On the principle of Astrometric Gravitational Wave Antenna*, 2021 under review process, <https://arxiv.org/pdf/2203.12760.pdf>

# Configurazione dell'antenna

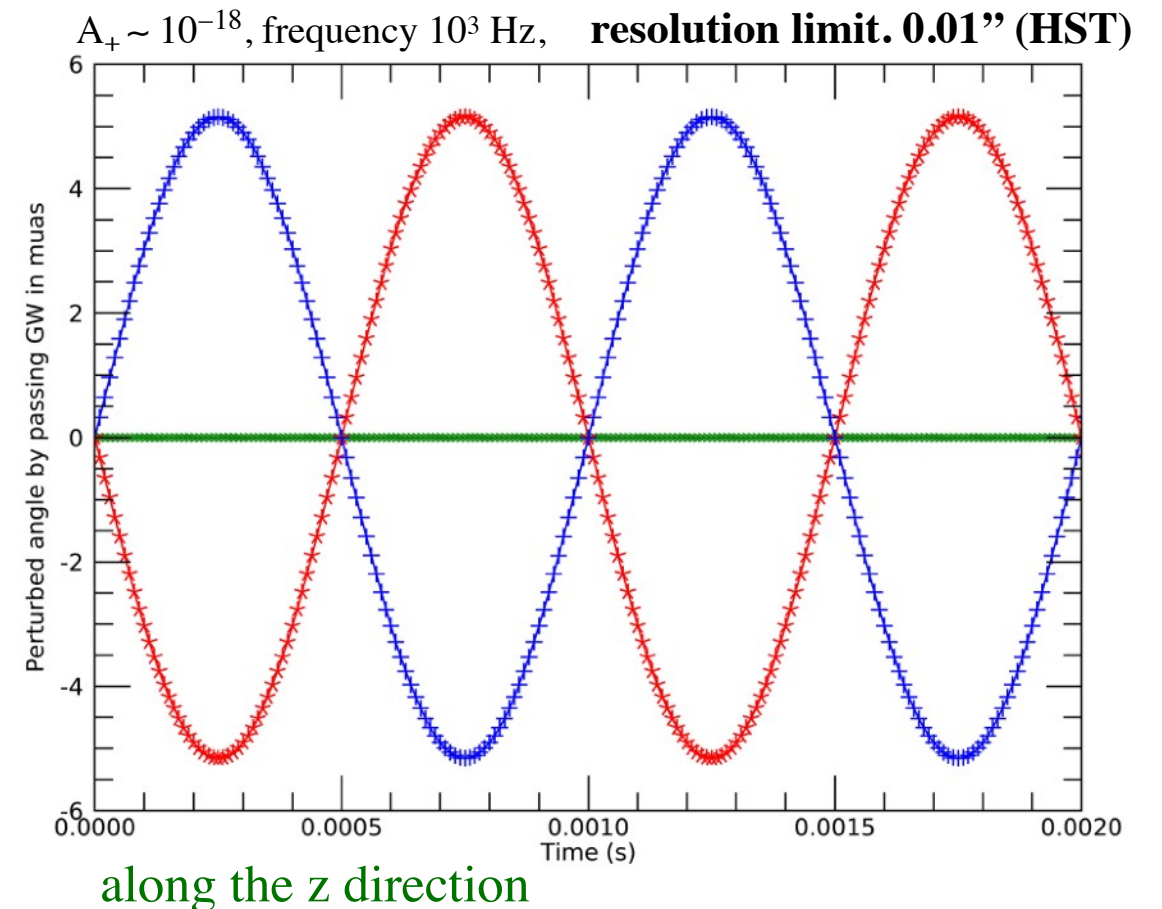
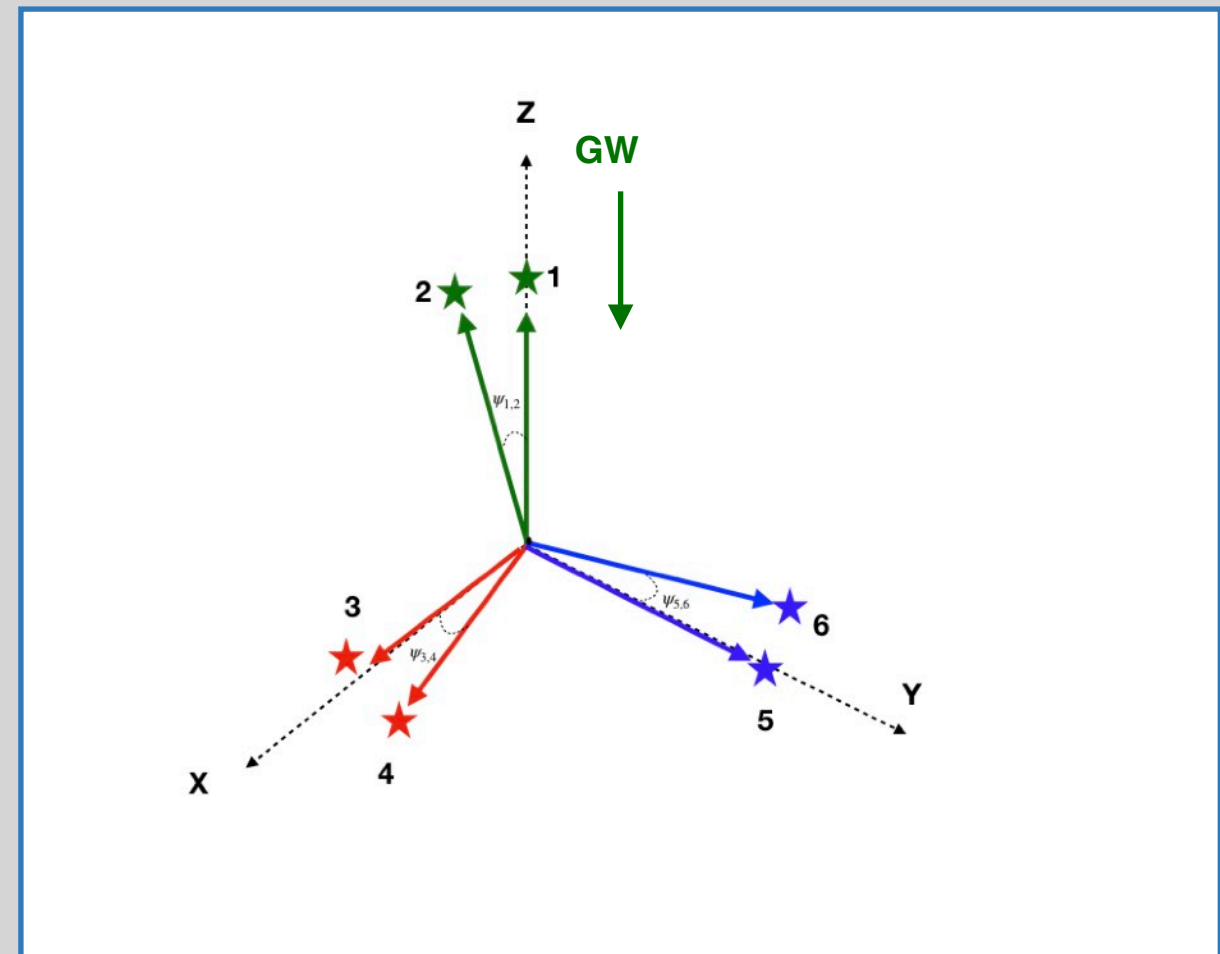
AstroGraWAnt rappresenta il “duale” (bracci angolari vs lineari) delle antenne lineari esistenti che implementa, all'interno di una configurazione relativamente compatta, linee di vista multiple (almeno 3) per la determinazione precisa immediata della direzione GW (un aspetto critico del rilevamento GW)

$$\delta\psi_{a,b}^{GW}(t) \sim \frac{h_{(obs)}^{GW}(t; a, b)}{\sin(\psi_{a,b}^{SS})}$$

- L'osservabilità della GW è AMPLIFICATA attraverso un fattore dipendente dall'angolo tra le direzioni imperturbate, limitato solo dal potere risolutivo ottico!

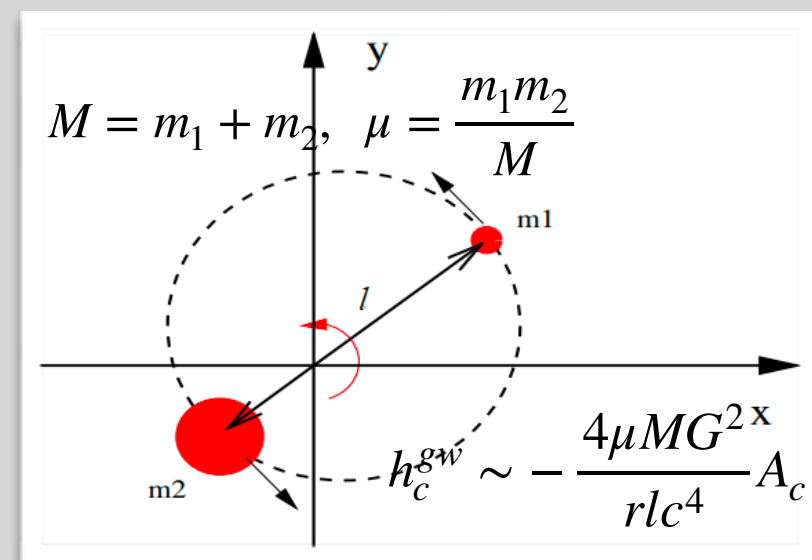
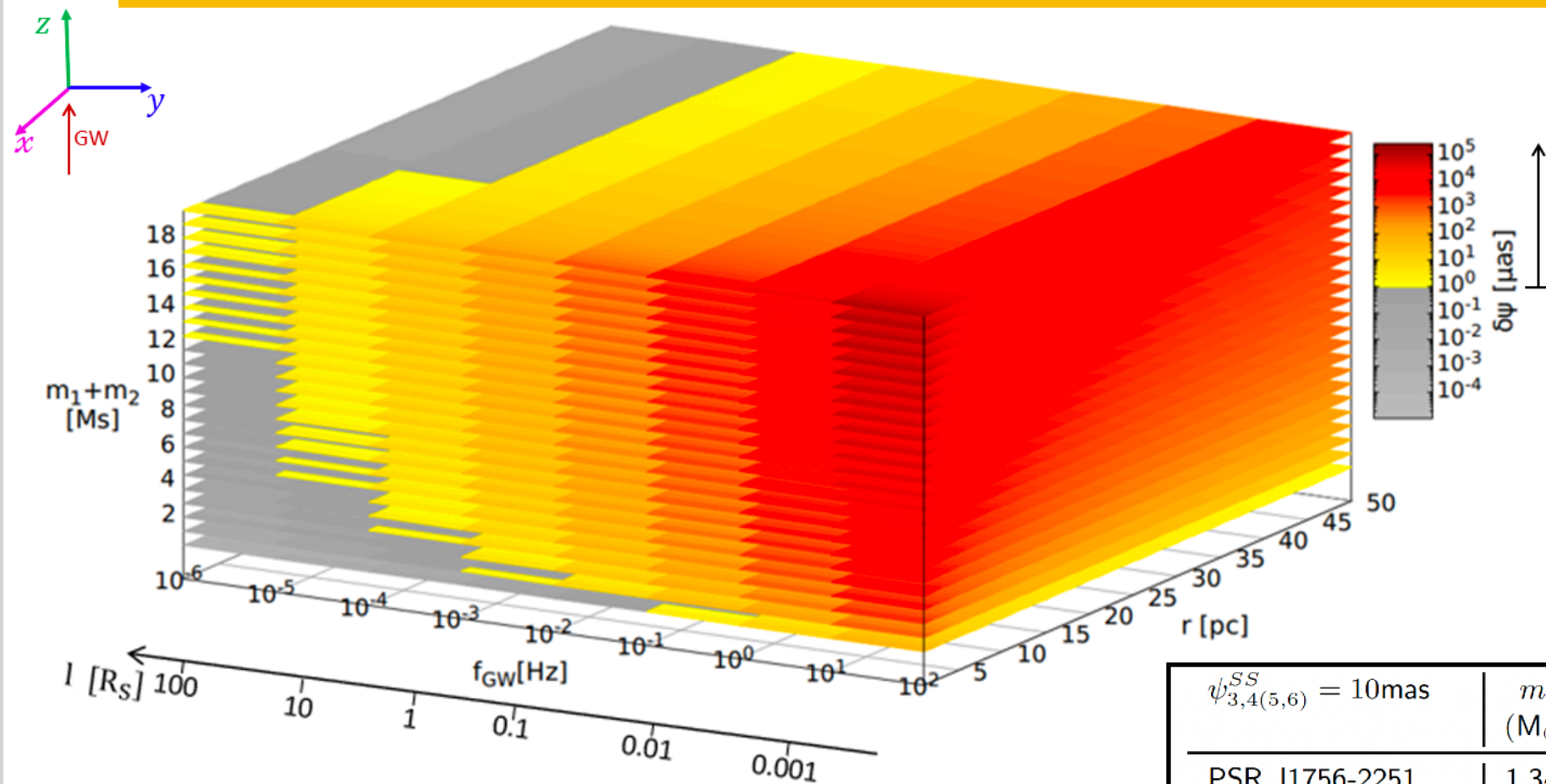
| $max(\delta\psi_{1,2}^{GW})$<br>( $\mu$ as) | $max(\delta\psi_{3,4}^{GW})$<br>( $\mu$ as) | $max(\delta\psi_{5,6}^{GW})$<br>( $\mu$ as) | $A_+$<br>(radians) | $\psi_{i_0, j_0}$<br>(") |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| $4.12 \times 10^{-15}$                      | 5.12                                        | 5.12                                        | $10^{-18}$         | 0.01                     |
| $4.12 \times 10^{-16}$                      | 51.57                                       | 51.57                                       | $10^{-18}$         | 0.001                    |

- I 3 angoli perturbati nelle tre direzioni ortogonali sono direttamente collegati alla GW -> DIREZIONE della sorgente!



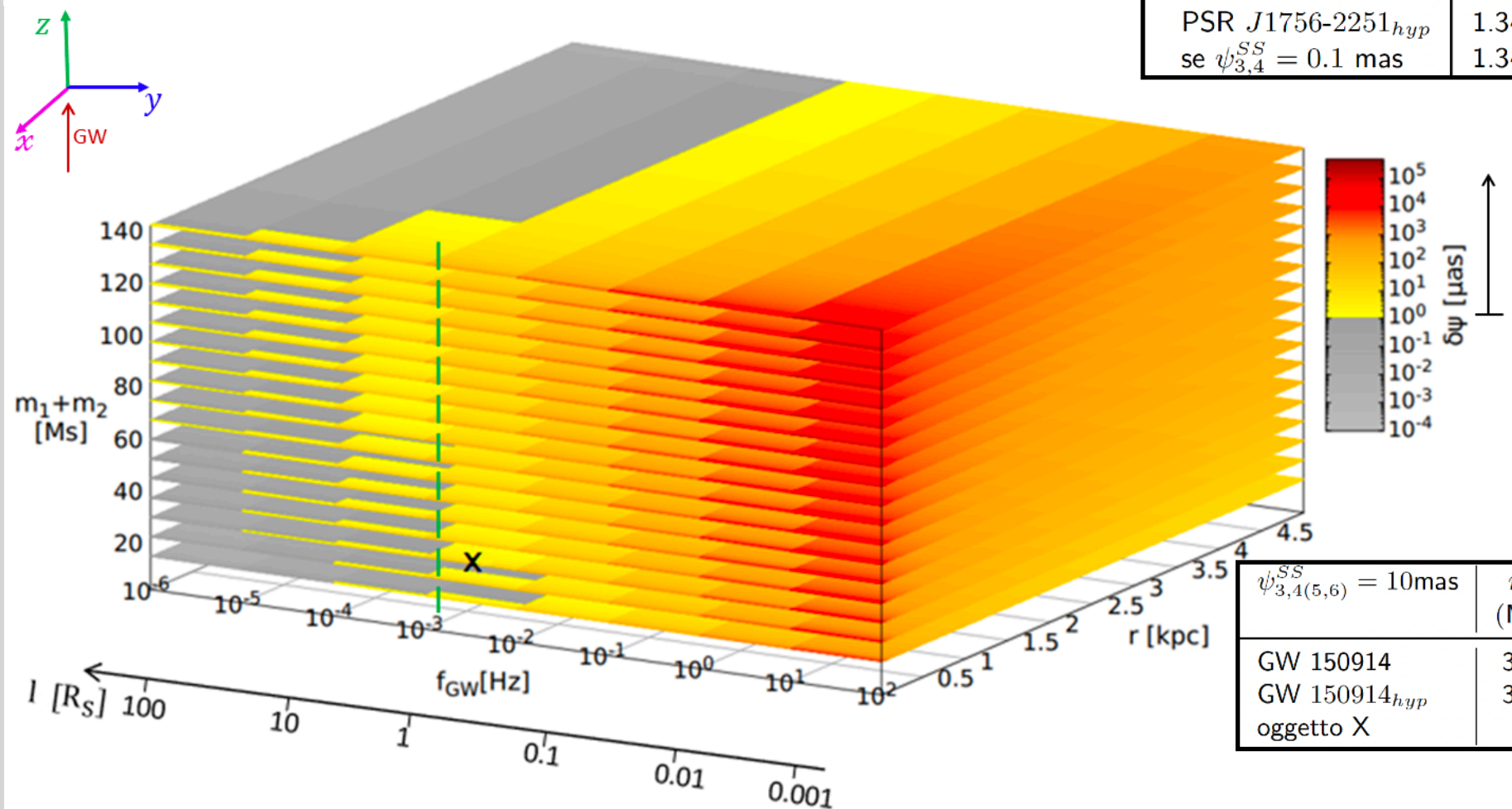


# Volume osservabile alle scale della Galassia: binarie



$$\omega_k = \sqrt{\frac{GM}{l^3}}, \quad \omega_{GW} = 2\omega_k$$

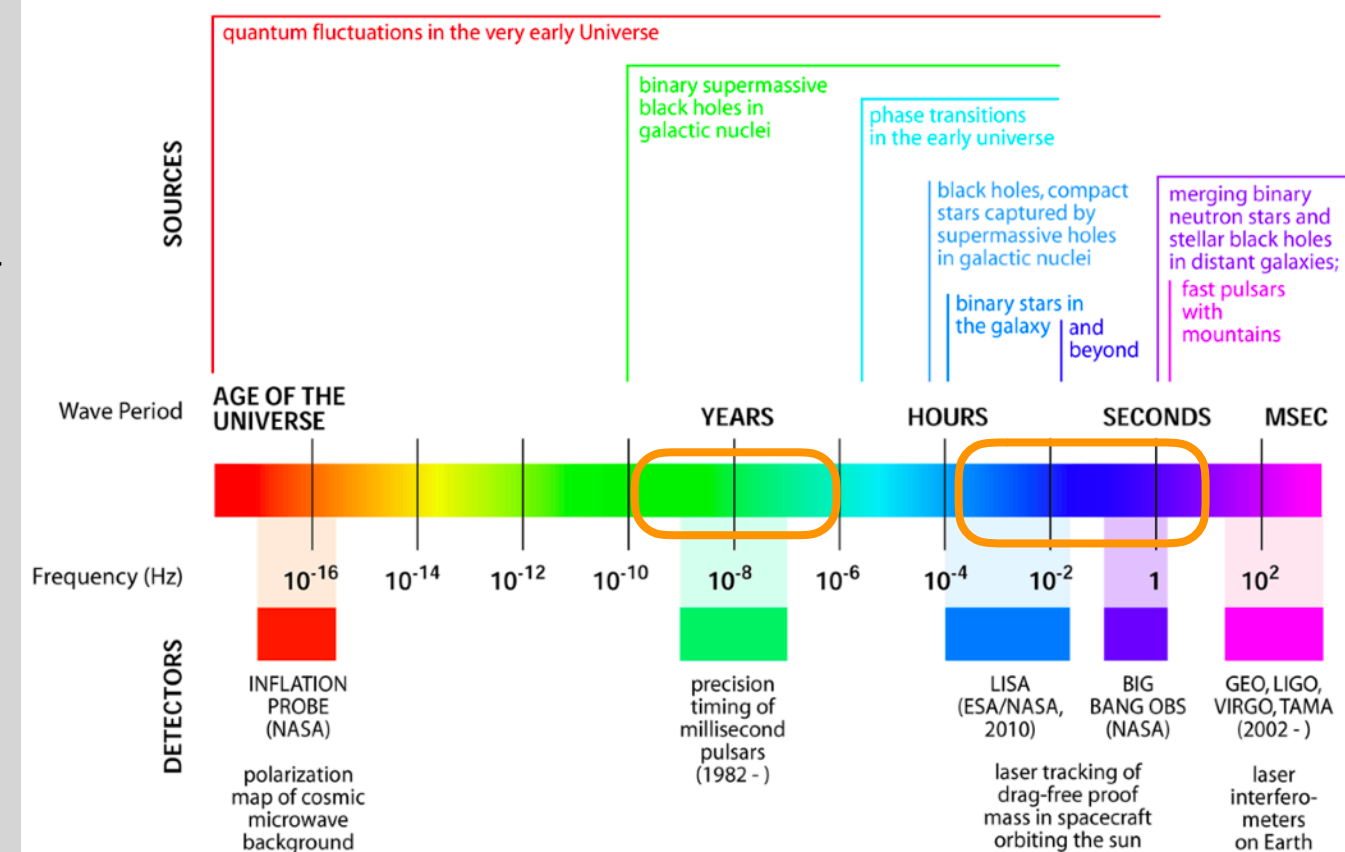
| $\psi_{3,4(5,6)}^{SS} = 10\text{mas}$  | $m_1$<br>( $M_\odot$ ) | $m_2$<br>( $M_\odot$ ) | $l$<br>( $R_\odot$ ) | $r$<br>(pc)       | $f_{GW}$<br>(Hz)     | $\max(\delta\psi_{3,4})$<br>( $\mu\text{as}$ ) |
|----------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|------------------------------------------------|
| PSR J1756-2251                         | 1.341                  | 1.230                  | 1.18                 | 1000              | $2.5 \times 10^{-4}$ | $\sim 2 \times 10^{-3}$                        |
| PSR J1756-2251 <sub>hyp</sub>          | 1.341                  | 1.230                  | 1.18                 | 50 <sub>hyp</sub> | $2.5 \times 10^{-4}$ | $\sim 5 \times 10^{-2}$                        |
| se $\psi_{3,4}^{SS} = 0.1 \text{ mas}$ | 1.341                  | 1.230                  | 1.18                 | 50 <sub>hyp</sub> | $2.5 \times 10^{-4}$ | $\Rightarrow 5$                                |



| $\psi_{3,4(5,6)}^{SS} = 10\text{mas}$ | $m_1$<br>( $M_\odot$ ) | $m_2$<br>( $M_\odot$ ) | $l$<br>( $R_\odot$ ) | $r$<br>(Mpc)         | $f_{GW}$<br>(Hz)   | $\max(\delta\psi_{3,4})$<br>( $\mu\text{as}$ ) |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| GW 150914                             | 36.5                   | 30.8                   | $\sim 0$             | 440                  | 30 – 250           | $\sim 4 \times 10^{-3}$                        |
| GW 150914 <sub>hyp</sub>              | 36.5                   | 30.8                   | 47.8                 | 0.005 <sub>hyp</sub> | $5 \times 10^{-6}$ | $\sim 8 \times 10^{-3}$                        |
| oggetto X                             | 20                     | 15                     | 1                    | 100 pc               | $10^{-3}$          | $\sim 5$                                       |

# Obiettivi scientifici

- **GW Galattiche, frequenze  $[10^{-4} - 10 \text{ Hz}]$  /ampiezza  $[10^{-24} - 10^{-18}]$ :** i) sistemi binari massivi BH/NS-BH nella loro fase di pre-merging; ii) popolazioni di binarie costituite da tutte le possibili combinazioni di stelle degeneri e BH stellari
- **GW cosmologiche frequenze  $[10^{-10} - 10^{-6}] \text{ Hz}$  / ampiezza  $[10^{-24} - 10^{-12}]$**

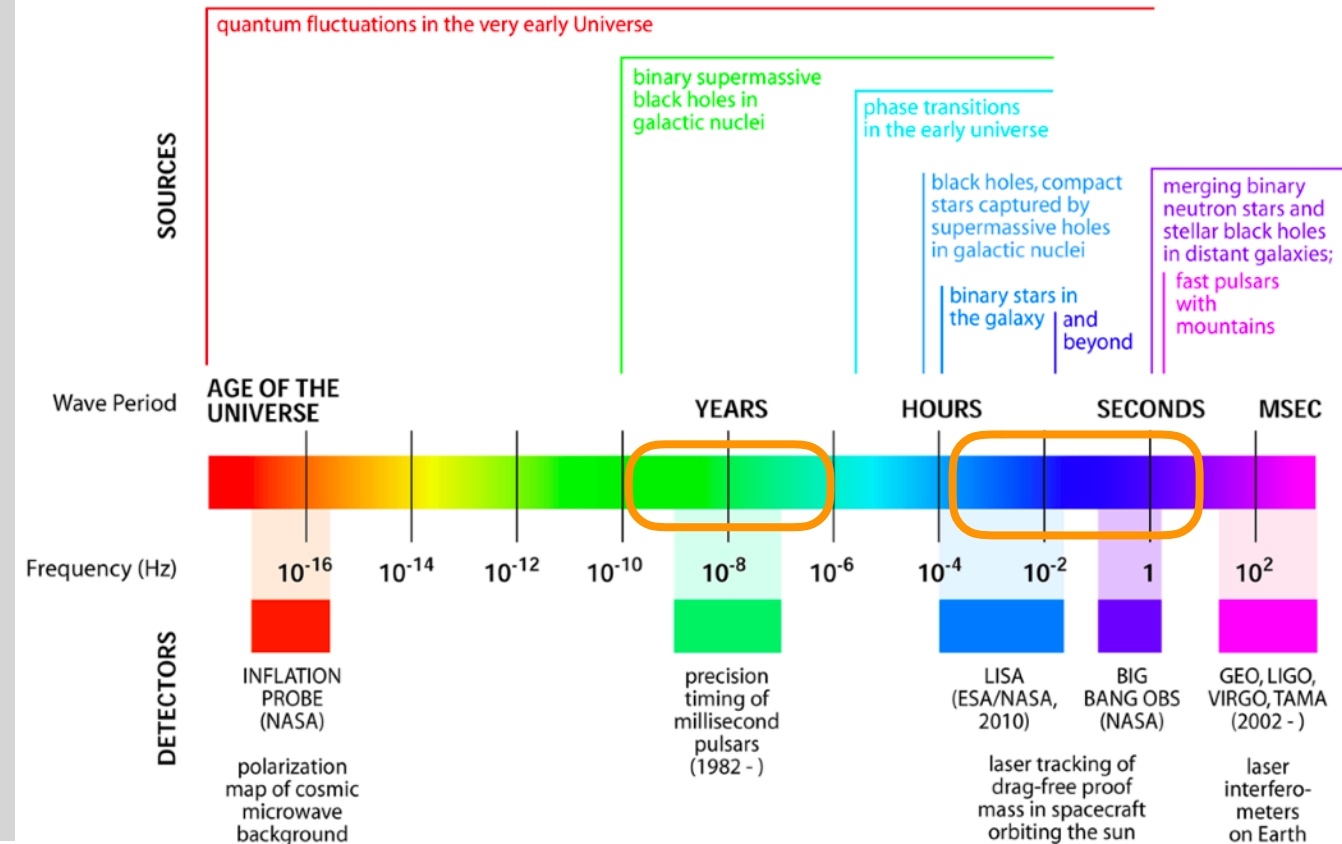


# Obiettivi scientifici

- **GW Galattiche, frequenze  $[10^{-4} - 10 \text{ Hz}]$  /ampiezza  $[10^{-24} - 10^{-18}]$ :** i) sistemi binari massivi BH/NS-BH nella loro fase di pre-merging; ii) popolazioni di binarie costituite da tutte le possibili combinazioni di stelle degeneri e BH stellari
- **GW cosmologiche frequenze  $[10^{-10} - 10^{-6}] \text{ Hz}$  / ampiezza  $[10^{-24} - 10^{-12}]$**

# Requisiti Scientifici

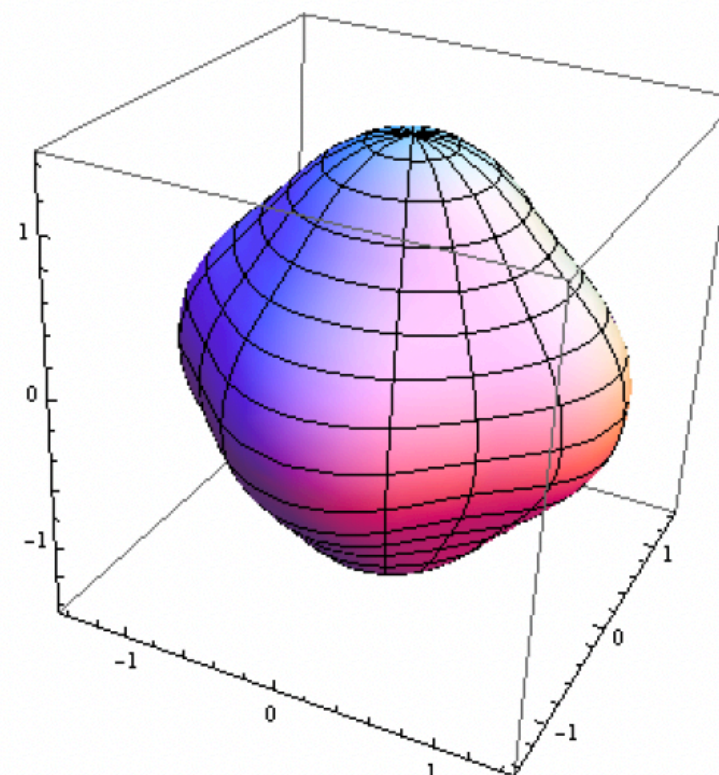
- configurazione relativamente compatta (scala del metro) per misurare la **direzione della sorgente GW** con precisione dei **sub-arcsec** >> caratterizzazione multilunghezza d'onda/messaggera delle sorgenti.
- **Sentinella delle GWs + “survey”** delle sorgenti GW
- **Complementarietà** con approcci esistenti e cross-verification



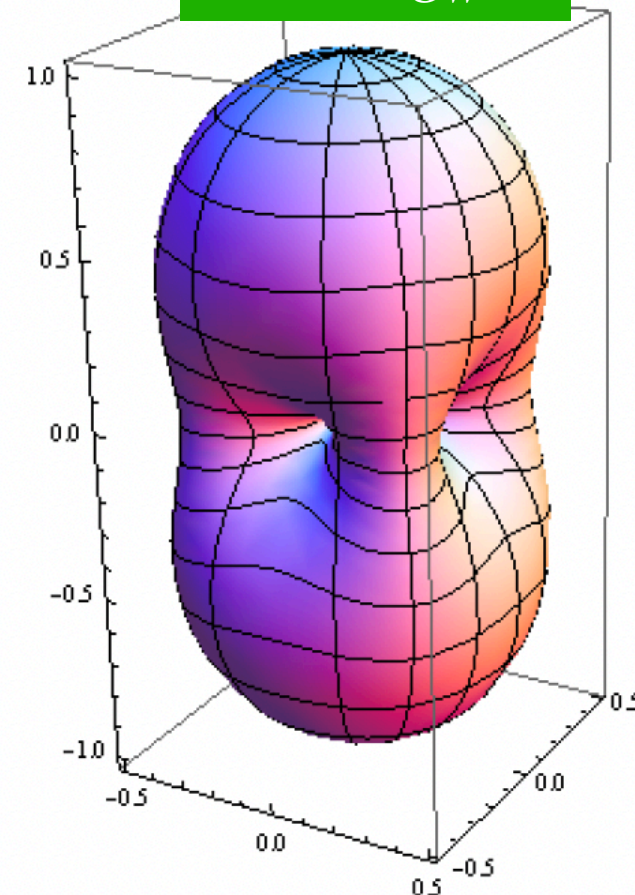
Detection volume/Amplitude pattern function

AstroGraWAnt

$$\delta\psi \propto \frac{h_{GW}}{\psi}$$



Interferometri

$$\delta L \propto h_{GW} L$$




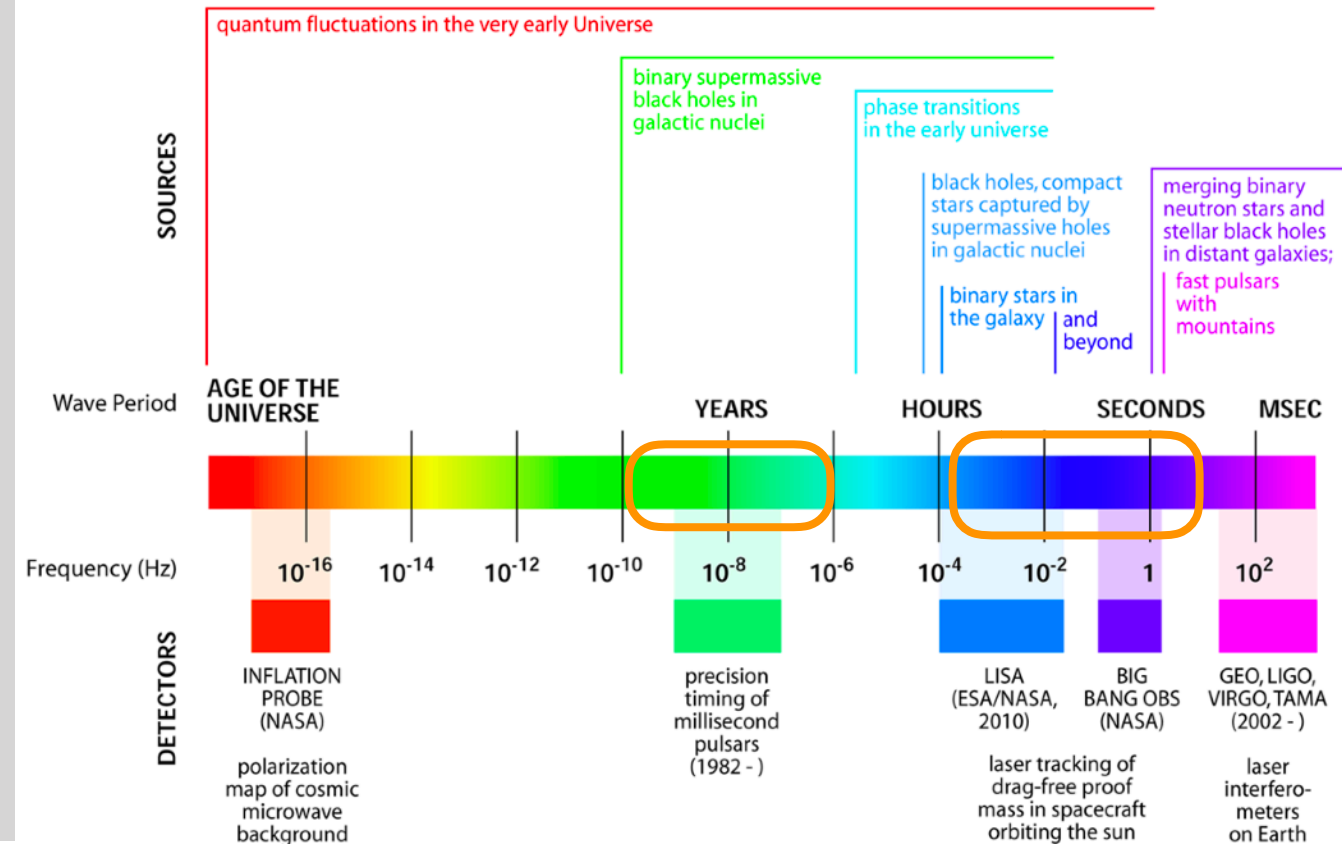
# Obiettivi scientifici

- **GW Galattiche, frequenze  $[10^{-4} - 10 \text{ Hz}]$  /ampiezza  $[10^{-24} - 10^{-18}]$ :** i) sistemi binari massivi BH/NS-BH nella loro fase di pre-merging; ii) popolazioni di binarie costituite da tutte le possibili combinazioni di stelle degeneri e BH stellari
- **GW cosmologiche frequenze  $[10^{-10} - 10^{-6}] \text{ Hz}$  / ampiezza  $[10^{-24} - 10^{-12}]$**

# Requisiti Scientifici

- configurazione relativamente compatta (scala del metro) per misurare la **direzione della sorgente GW** con precisione dei **sub-arcsec** >> caratterizzazione multilunghezza d'onda/messaggera delle sorgenti.
- **Sentinella delle GWs + “survey”** delle sorgenti GW
- **Complementarietà** con approcci esistenti e cross-verification
- algoritmi adattabili ad un'analisi congiunta dei dati PTA e Gaia (PRIN MUR 22 PTA&Gaia e scheda PTA+GR)
- Studi di fattibilità con ASTRA (PI M. Gai)

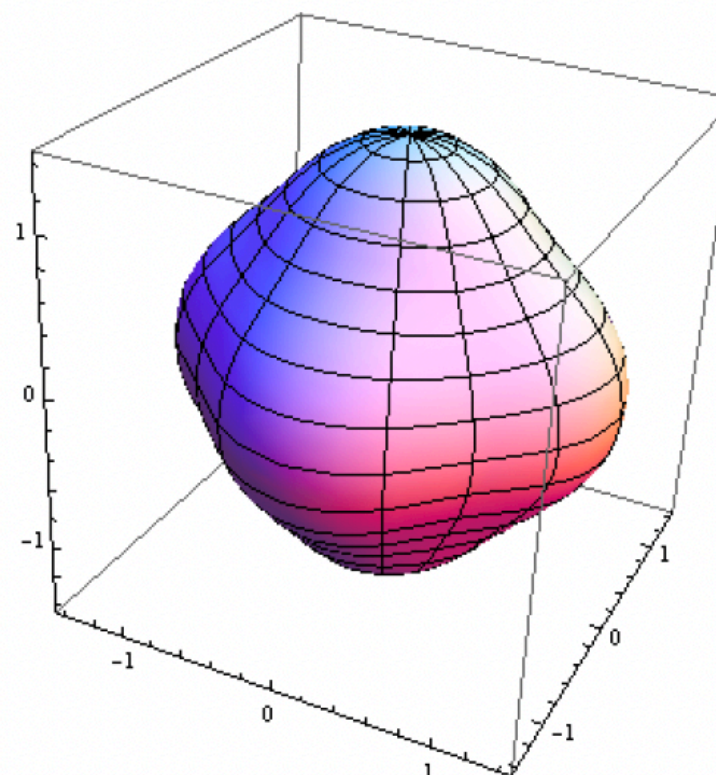
presentato alla XXIII SIGRAV (plenary talk) e in ASI “TEMATICHE E OBIETTIVI PER FUTURI PROGRAMMI SCIENTIFICI SPAZIALI”



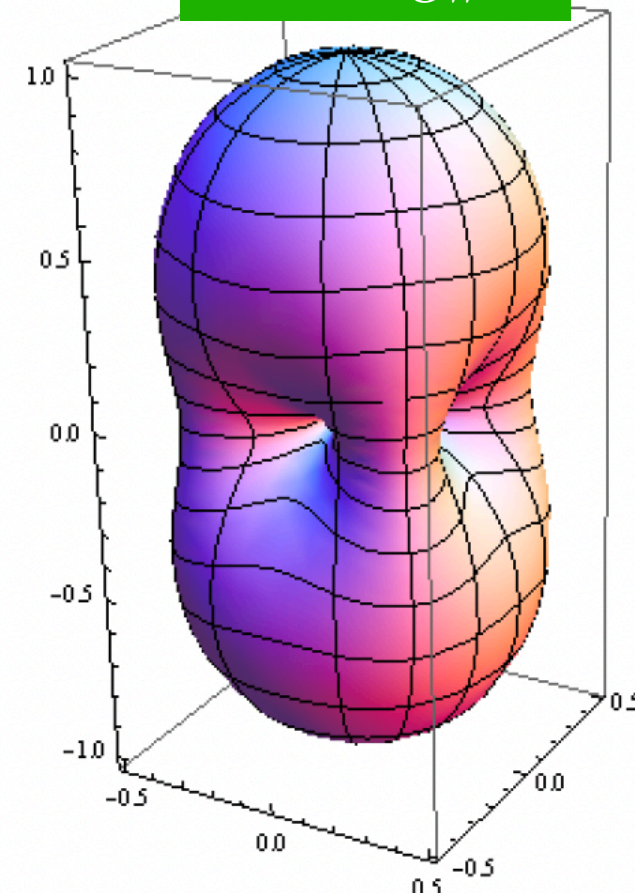
Detection volume/Amplitude pattern function

AstroGraWAnt

$$\delta\psi \propto \frac{h_{GW}}{\psi}$$



Interferometri

$$\delta L \propto h_{GW} L$$


# Obiettivi scientifici

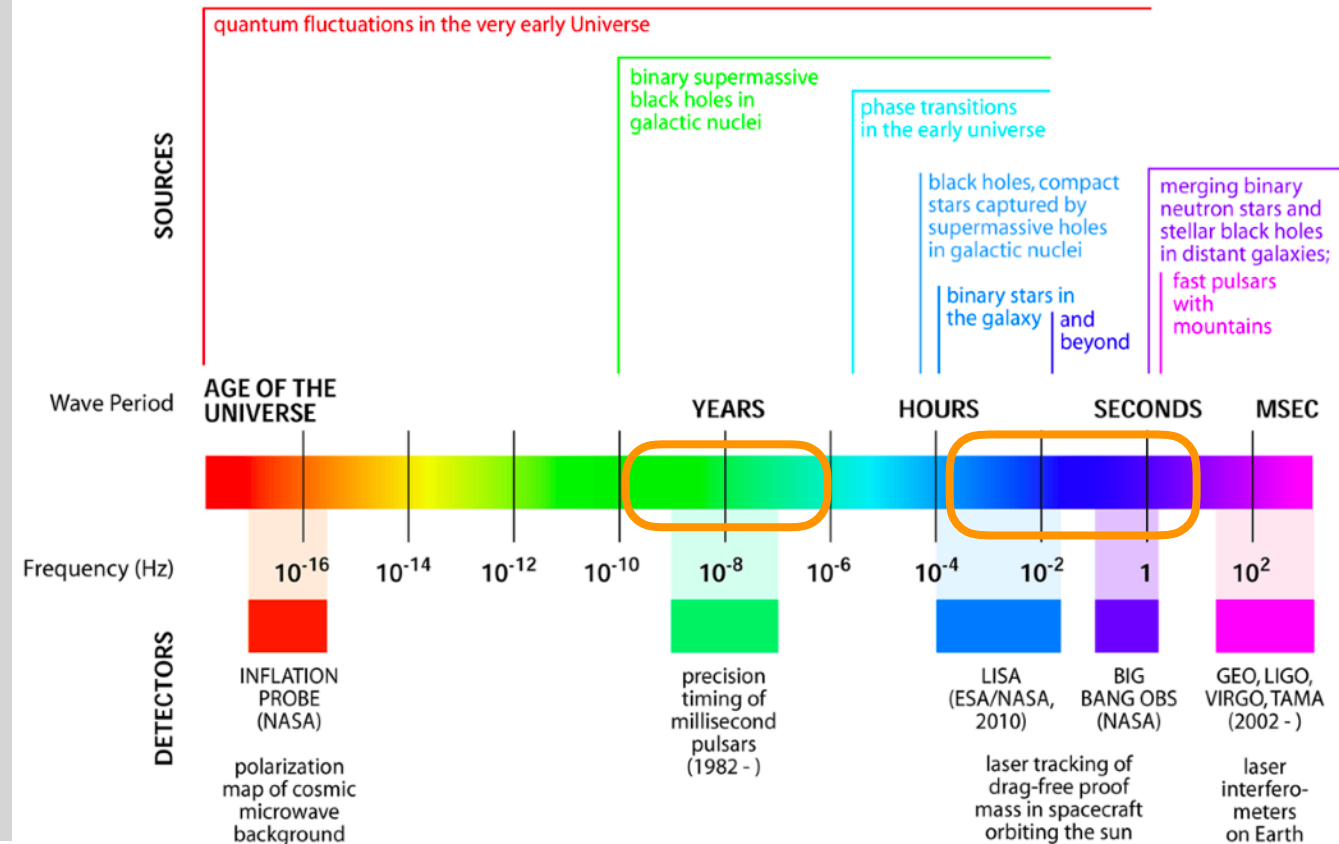
- **GW Galattiche, frequenze [10<sup>-4</sup> - 10 Hz] /ampiezza [10<sup>-24</sup> -10<sup>-18</sup>]:** i) sistemi binari massivi BH/NS-BH nella loro fase di pre-merging; ii) popolazioni di binarie costituite da tutte le possibili combinazioni di stelle degeneri e BH stellari
- **GW cosmologiche frequenze [10<sup>-10</sup> - 10<sup>-6</sup>] Hz / ampiezza [10<sup>-24</sup> -10<sup>-12</sup>]**

# Requisiti Scientifici

- configurazione relativamente compatta (scala del metro) per misurare la **direzione della sorgente GW** con precisione dei **sub-arcsec** >> caratterizzazione multilunghezza d'onda/messaggera delle sorgenti.
- **Sentinella delle GWs + “survey”** delle sorgenti GW
- **Complementarietà** con approcci esistenti e cross-verification
- algoritmi adattabili ad un'analisi congiunta dei dati PTA e Gaia (PRIN MUR 22 PTA&Gaia e scheda PTA+GR)
- Studi di fattibilità con ASTRA (PI M. Gai)

**presentato alla XXIII SIGRAV (plenary talk) e in ASI “TEMATICHE E OBIETTIVI PER FUTURI PROGRAMMI SCIENTIFICI SPAZIALI”**

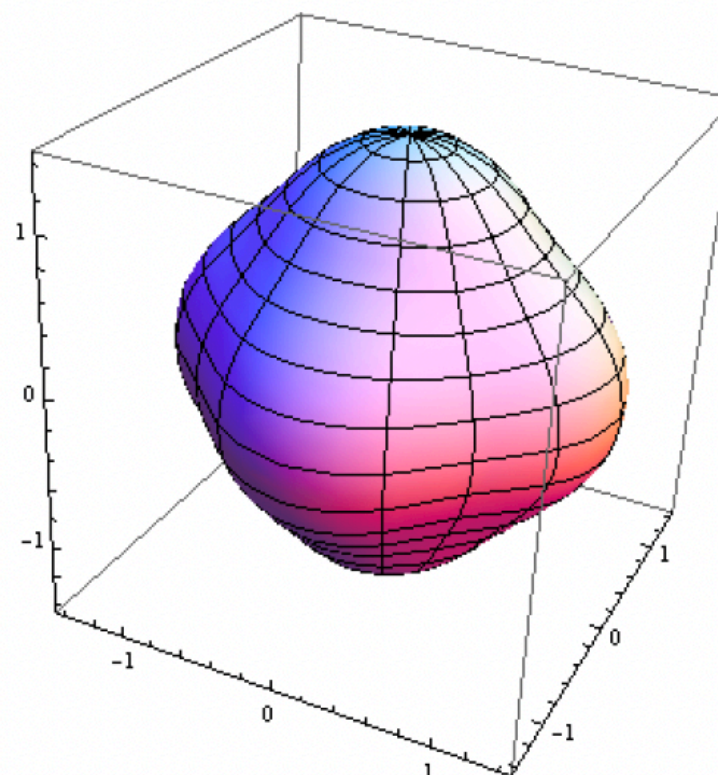
Tesi magistrale: *Gravitational waves detection in the context of relativistic astrometry*, F.Santucci  
(Rel. Crosta - Lattanzi)



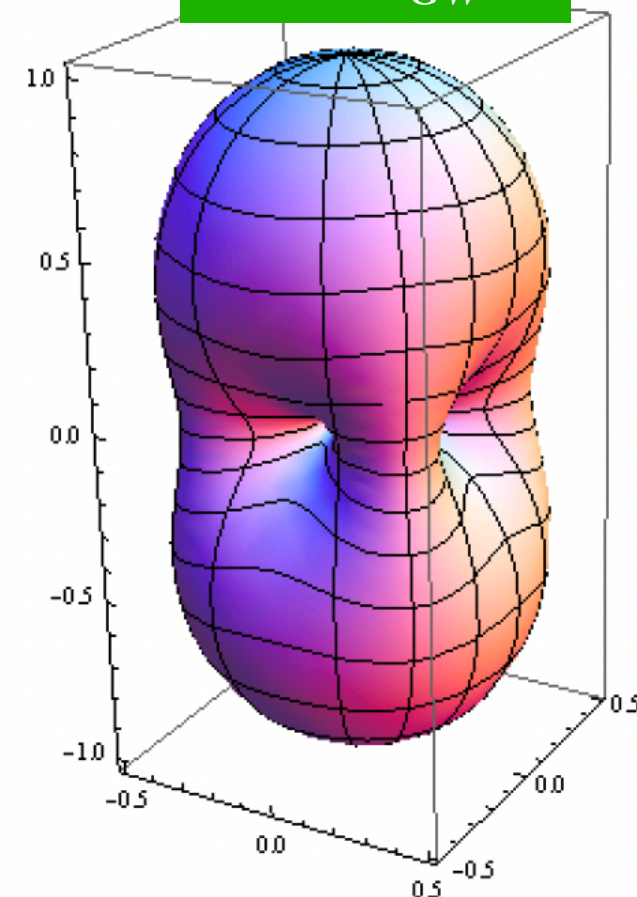
Detection volume/Amplitude pattern function

**AstroGraWAnt**

$$\delta\psi \propto \frac{h_{GW}}{\psi}$$



**Interferometri**  
 $\delta L \propto h_{GW}L$

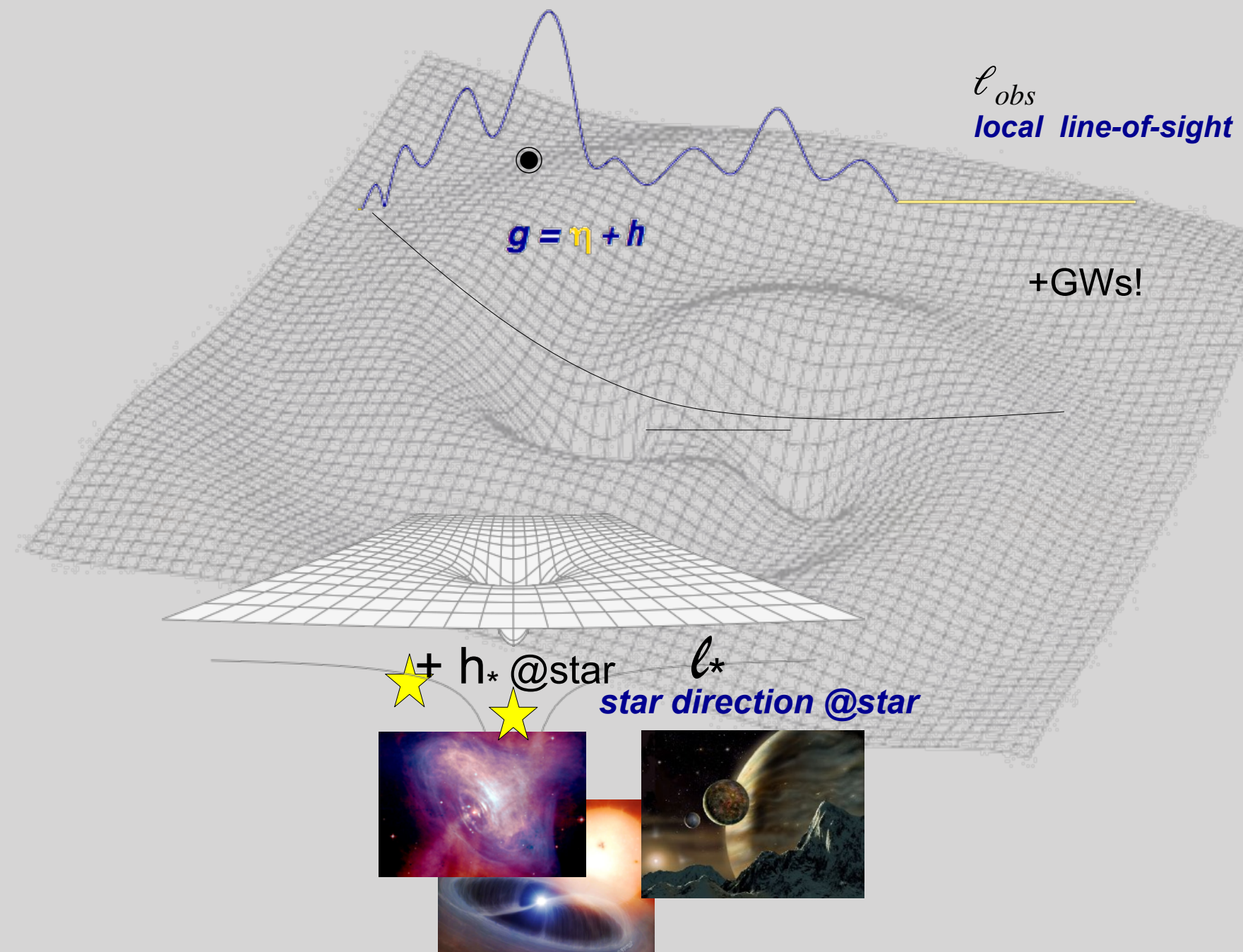




# 4. Astronavigazione: dall'osservatore alle stelle attraverso le geometrie dello spaziotempo

metriche per la cartografia stellare,  
misure di tempo+ spazio per osservatori locali  
sistemi di riferimento celesti  
GW, metrologia gravito-quantistica, singolarità  
entanglement, teletrasporto, natura del tempo

Base per i **viaggi nello spaziotempo**  
riportano in auge l'astrometria come disciplina che  
indaga sulle diverse nozioni di Tempo

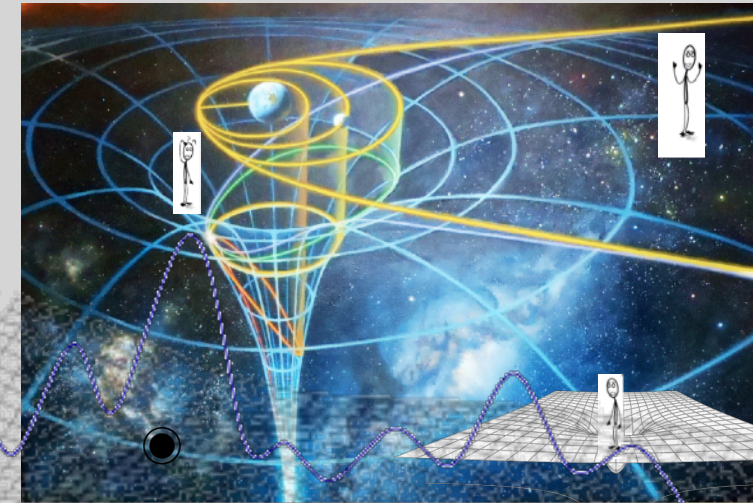




# 4. Astronavigazione: dall'osservatore alle stelle attraverso le geometrie dello spaziotempo

metriche per la cartografia stellare,  
misure di tempo+ spazio per osservatori locali  
sistemi di riferimento celesti  
GW, metrologia gravito-quantistica, singolarità  
entanglement, teletrasporto, natura del tempo

Base per i **viaggi nello spaziotempo**  
riportano in auge l'astrometria come disciplina che  
indaga sulle diverse nozioni di Tempo



$\ell_{obs}$   
local line-of-sight

$$g = \eta + h$$

+GWs!

$+ h_* @star$   $\ell_*$   
star direction @star

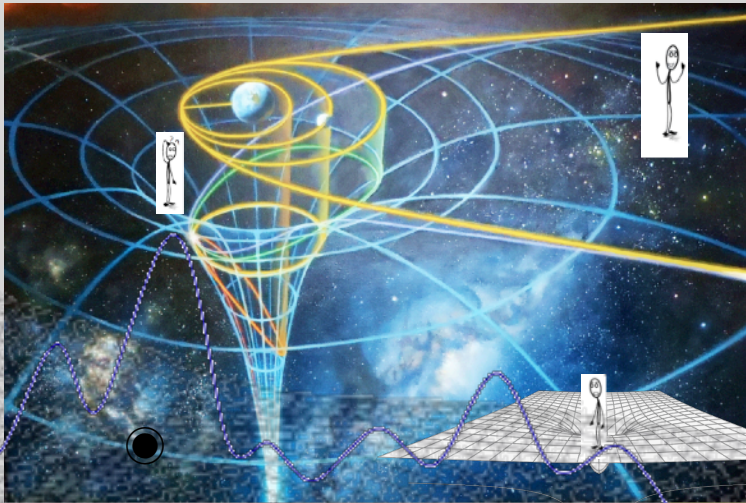




# 4. Astronavigazione: dall'osservatore alle stelle attraverso le geometrie dello spaziotempo

metriche per la cartografia stellare,  
misure di tempo+ spazio per osservatori locali  
sistemi di riferimento celesti  
GW, metrologia gravito-quantistica, singolarità  
entanglement, teletrasporto, natura del tempo

Base per i **viaggi nello spaziotempo**  
riportano in auge l'astrometria come disciplina che  
indaga sulle diverse nozioni di Tempo



$\ell_{obs}$   
local line-of-sight

$g = \eta + h$

+GWs!

matching star directions:  
from the local line-of-sight to  
the local direction at the star



$h_* @ star$   $\ell_*$   
star direction @star





# 4. Astronavigazione: dall'osservatore alle stelle attraverso le geometrie dello spaziotempo

metriche per la cartografia stellare,  
misure di tempo+ spazio per osservatori locali  
sistemi di riferimento celesti  
GW, metrologia gravito-quantistica, singolarità  
entanglement, teletrasporto, natura del tempo

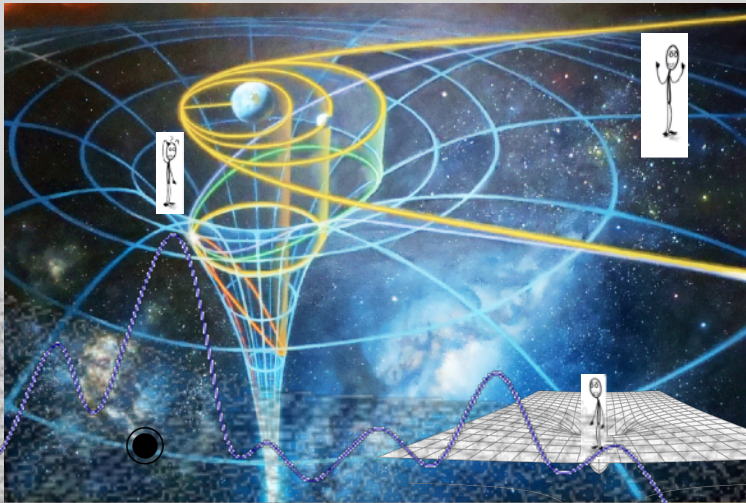
"The Time Machine Factory [unspeakeable, speakable] on Time Travel in Turin" si è confermato negli anni come conferenza di successo, relazionando ricerche su aspetti di frontiera per l'astrofisica, la gravitazione, la matematica, le tecnologie spaziali, i sistemi di riferimento celesti e la fisica quantistica.

<https://indico.ict.inaf.it/event/751/>

Crosta and M. Gramegna and M.L. Ruggiero;EPJ Web of Conferences, Volume 58, 2013



Base per i **viaggi nello spaziotempo**  
riportano in auge l'astrometria come disciplina che  
indaga sulle diverse nozioni di Tempo



$\ell_{obs}$   
**local line-of-sight**

$$g = \eta + h$$

+GWs!

**matching star directions:**  
from the local line-of-sight to  
the local direction at the star



$+ h_* @star$   $\ell_*$   
**star direction @star**





# 4. Astronavigazione: dall'osservatore alle stelle attraverso le geometrie dello spaziotempo

metriche per la cartografia stellare,  
misure di tempo+ spazio per osservatori locali  
sistemi di riferimento celesti  
GW, metrologia gravito-quantistica, singolarità  
entanglement, teletrasporto, natura del tempo

Base per i **viaggi nello spaziotempo**  
riportano in auge l'astrometria come disciplina che  
indaga sulle diverse nozioni di Tempo

"The Time Machine Factory [unspeakeable, speakable] on Time Travel in Turin" si è confermato negli anni come conferenza di successo, relazionando ricerche su aspetti di frontiera per l'astrofisica, la gravitazione, la matematica, le tecnologie spaziali, i sistemi di riferimento celesti e la fisica quantistica.

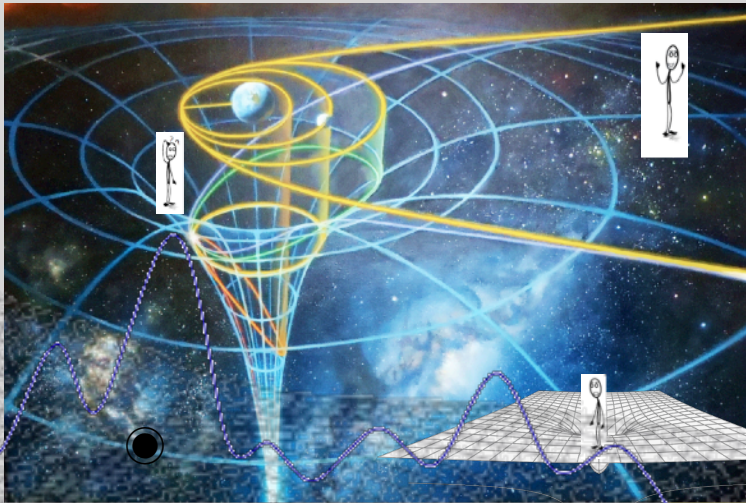
<https://indico.ict.inaf.it/event/751/>

Crosta and M. Gramegna and M.L. Ruggiero;EPJ Web of Conferences, Volume 58, 2013



collaborazioni con l'INRiM, UniTo (dip. Matematica), Univ. di Praga, Syrté - Osserv. di Parigi, SIGRAV

Attività di stage  
2021 G. Fiorillo on "Analysis of weak relativistic effects for relativistic astrometry applied to space-time navigation"  
2022 M.Falco "Implementazione di algoritmi relativistici per l'astronavigazione e test di fisica fondamentale nello spazio"



$\ell_{obs}$   
**local line-of-sight**

+GWs!

**matching star directions:  
from the local line-of-sight to  
the local direction at the star**



$h_* @star$   
 $\ell_*$   
**star direction @star**



- ◆ L'uso “obbligatorio” della RG ha aperto nuove possibilità e strategie per applicare la Teoria di Einstein nel campo dell'astronomia classica, fornendo nuovi metodi e "laboratori" per testare la gravità
- ◆ I primi risultati sono davvero promettenti, hanno implicato diversi invited talks, stimolato collaborazioni

## Sinergie con:

RSN1 (materia e energia oscura, modelli LCDM e teorie alternative alla gravità della RG);

RSN3 (metriche IAU e proprietà dei pianeti e dei corpi minori del sistema solare);

RSN4 (onde gravitazionali, tests GR);

RSN5 (tecnologie per misure ad altissima precisione fino a frazioni del sub-microarcosecondo)

Schede CARPA/STARK/ASTRA

Università e INFN

Terza Missione



- ◆ L'uso "obbligatorio" della RG ha aperto nuove possibilità e strategie per applicare la Teoria di Einstein nel campo dell'astronomia classica, fornendo nuovi metodi e "laboratori" per testare la gravità
- ◆ I primi risultati sono davvero promettenti, hanno implicato diversi invited talks, stimolato collaborazioni

## Sinergie con:

RSN1 (materia e energia oscura, modelli LCDM e teorie alternative alla gravità della RG);

RSN3 (metriche IAU e proprietà dei pianeti e dei corpi minori del sistema solare);

RSN4 (onde gravitazionali, tests GR);

RSN5 (tecnologie per misure ad altissima precisione fino a frazioni del sub-microarcosecondo)

Università e INFN

Terza Missione

## Blue\_Gang

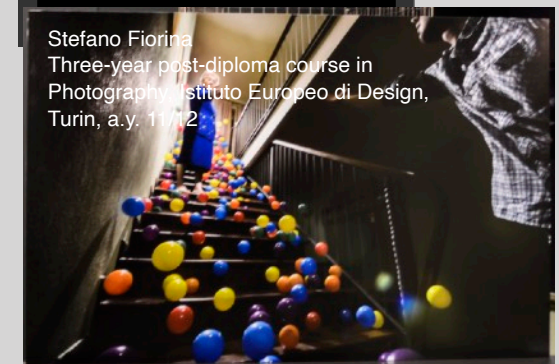
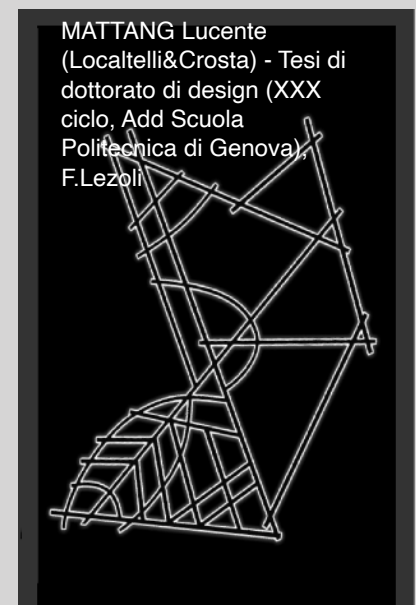
*Borders of the Local Universe: Gaia and not Gaia*  
*-The onset of "Stellar Anthropology"*

La scheda prende spunto da alcune attività di divulgazione e disseminazione intraprese per Gaia ([http://www.brera.inaf.it/SAIT2014/parallela/Mariateresa\\_Crosta\\_Gaia\\_SAlt2014.pdf](http://www.brera.inaf.it/SAIT2014/parallela/Mariateresa_Crosta_Gaia_SAlt2014.pdf)), implementabili oltre Gaia e attrattive per diverse categorie professionali e discipline per dare avvio al campo dell' "antropologia stellare"

-> opportunità di "cross-fertilization" /contaminazione tra discipline e prassi diverse, coinvolgimento di comunità più ampie, diverse e diffuse

Attività a livello nazionale con: cooperative nelle carceri, registi, coreografi, compositori, musicisti, artisti, istituti di design, archeologi, storici, fotografi (<https://www.media.inaf.it/2018/05/15/mostra-phos-torino/9>), produttori di animazioni, fondazioni, ....

Schede CARPA/STARK/ASTRA





- ❖ L'uso "obbligatorio" della RG ha aperto nuove possibilità e strategie per applicare la Teoria di Einstein nel campo dell'astronomia classica, fornendo nuovi metodi e "laboratori" per testare la gravità
- ❖ I primi risultati sono davvero promettenti, hanno implicato diversi invited talks, stimolato collaborazioni

## Sinergie con:

RSN1 (materia e energia oscura, modelli LCDM e teorie alternative alla gravità della RG);

RSN3 (metriche IAU e proprietà dei pianeti e dei corpi minori del sistema solare);

RSN4 (onde gravitazionali, tests GR);

RSN5 (tecnologie per misure ad altissima precisione fino a frazioni del sub-microarcosecondo)

Università e INFN

Terza Missione

## Blue\_Gang

*Borders of the Local Universe: Gaia and not Gaia*  
*-The onset of "Stellar Anthropology"*

La scheda prende spunto da alcune attività di divulgazione e disseminazione intraprese per Gaia ([http://www.brera.inaf.it/SAIT2014/parallela/Mariateresa\\_Crosta\\_Gaia\\_SAlt2014.pdf](http://www.brera.inaf.it/SAIT2014/parallela/Mariateresa_Crosta_Gaia_SAlt2014.pdf)), implementabili oltre Gaia e attrattive per diverse categorie professionali e discipline per dare avvio al campo dell' "antropologia stellare"

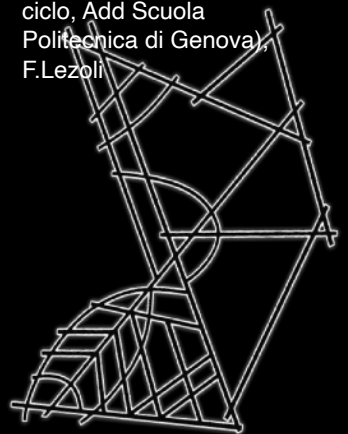
-> opportunità di "cross-fertilization" /contaminazione tra discipline e prassi diverse, coinvolgimento di comunità più ampie, diverse e diffuse

Attività a livello nazionale con: cooperative nelle carceri, registi, coreografi, compositori, musicisti, artisti, istituti di design, archeologi, storici, fotografi (<https://www.media.inaf.it/2018/05/15/mostra-phos-torino/9>), produttori di animazioni, fondazioni, ....

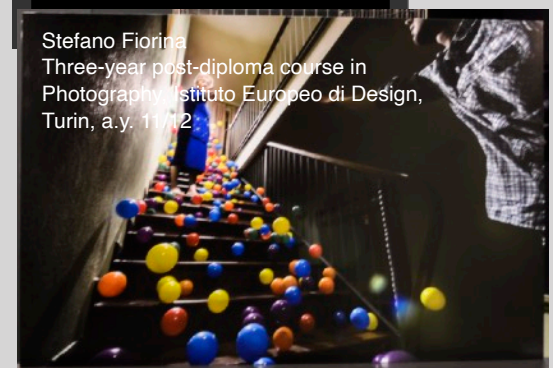
WINGs (**Women In GravitieS**, <https://indico.ict.inaf.it/event/751/page/425-wings>) è una sessione speciale dedicata al contributo femminile nelle cosiddette "hard science" nel ciclo di conferenze Time Machine

Schede CARPA/STARK/ASTRA

MATTANG Lucente  
 (Locatelli&Crosta) - Tesi di  
 dottorato di design (XXX  
 ciclo, Add Scuola  
 Politecnica di Genova)  
 F.Lezoli



Stefano Fiorina  
 Three-year post-diploma course in  
 Photography, Istituto Europeo di Design,  
 Turin, a.y. 11/12



## GRAVIMETRA

-si basa su due ingredienti: misure ad altissima precisione dallo spazio e modelli relativistici per la loro analisi [es. **astrometria/Galassia relativistica**] e interpretazione [**astronomia gravitazionale/fisica fondamentale**]

- presenta una produzione scientifica articolata in lavori pionieristici e specialistici pubblicati su varie riviste di carattere fisico-matematico/astrofisico, ma anche divulgativo (es. Corriere della Sera La Lettura, La Stampa, Rivista Sapere, MEDIA INAF, etc.)

- Il programma di ricerca esposto si contraddistingue per unicità (**il modello relativistico italiano, uno dei 2 approcci esistenti a livello internazionale, è tutto made INAF così come l'idea della nuova antenna gravitazionale astrometrica nello spazio**) e avrà negli anni un impatto sempre più tangibile, come dimostra il successo della missione Gaia e quanto stiamo ereditando da questa esperienza per futuri programmi (es. EUCLID)
- La **metrologia gravitazionale nel contesto dell'astronomia** si pone al centro di questioni di fisica fondamentale pertinenti all'INFN, INRIM; di **aspetti teorici della RG avanzati** che si interfacciano con quelli sviluppabili nei Dipartimenti di Fisica e Matematica, nonché di **progetti spaziali** che coinvolgono ESA e ASI (che possono utilizzare **infrastrutture INAF per test di fattibilità**)
- corsi superiori (master II livello) come GMAC che coniugano i **metodi dell'Astronomia fondamentale con aspetti di metrologia avanzata nell'ambito della Relatività Generale** creano **nuove expertise** necessarie nella pianificazione e configurazione delle prossime missioni spaziali ad altissima precisione e, quindi, **pone l'INAF sempre di più in un ruolo di leadership su queste tematiche.**

# TEAM

- GRAVIMETRA si avvale di riconosciute competenze multidisciplinari (teoriche e tecnologiche) sviluppate in 30 anni nell'ambito delle missioni Hipparcos e Gaia dal personale INAF in cui svolge un ruolo di primo piano nella definizione degli aspetti scientifici e tecnologici con il fondamentale supporto dell'ASI. A livello internazionale, ASTROGRAWANT è sostenuto dalle collaborazioni attive di Cina (CAS@SHAO) e Francia (IMCCE).

**TOT FTE 22-24 Gravimetra 7.9**  
**TOT FTE 22-24 Blue\_Gang 2.1**  
**TOT FTE 22-24 GMAC 0.9**

## **INAF-OATo**

### **FTE TI effettive**

Ummi Abbas, Stefano Bertone, Beatrice Bucciarelli, Mariateresa Crosta, Roberto Morbidelli, Mario G. Lattanzi, Paola Re Fiorentin, Alessandro Spagna, Alberto Vecchiato, Maria Sarasso [astrometria relativistica/gravitazionale, test GR, GWs, ASTROGRAWANT, Cosmologia Locale, Galassia Relativistica, BlueGang, GMAC]

### **FTE TI POTENZIALI/EXTRA**

Deborah Busonero, Alberto Riva, Mario Gai [ASTRA, ASTROGRAWANT, sviluppo tecnologie sub-muas, GMAC]

### **Dottorandi**

William Beordo [Galassia relativistica]

### **Research Scientist**

Volodymyr Akhmenatov (Kharazin University, Ucraina) [Galassia]

### **Collaboratori associati:**

Federica Santucci (OATo), Alexey Butkevich (Pulkovo Observatory, Russia), Liao Shilong Qi Zhaoxiang (CAS@SHAO, Cina), Eloisa Poggio (OCA, Francia) [GWs, ASTROGRAWANT, Astrometria Relativistica, Galassia]

Angelo Tartaglia (Politecnico di Torino, OATo) [tests GR, Time Machine]

## **Collaboratori INAF**

Gisella Clementini, OAS Bologna [SHoT, H0, ISSI TEAM 490]

Alessandro Corongiu, Delphine Perrodin, Andrea Possenti, Caterina Triburzi (OA Cagliari) [PTA+Gaia, GWs]

## **Collaboratori esterni**

Christophe Leponcin-Lafitte (SYRTE, IMCEE, Obs. de Paris, Univ. PSL, CNRS, Sorbonne Univ. Paris.) [ASTROGRAWANT, Time Machine]

Marco Bruni (Portsmouth Univ.) [Galassia Relativistica, H0]

Antonaldo Diaferio, Luisa Ostorero, Stefano Camera (UNTo, Dip. di Fisica) [Galassia, GMAC]

Alessandro Pizzella (Dip. di Fisica e Astronomia, Univ. di Padova) [galassie esterne vs Galassia relativistica]

Francesco Haardt, Sergio Cacciatore (Insubria)/Massimo Dotti, Alberto Sesana (Milano Bicocca) [PRIN MUR, modelli galassia rel., PTA+Gaia]

Oldrich Semerack (FMP-Charles Univ. Prague) [Galassia Relativistica, Time Machine]

S. Coriasco, L. Fatibene (UNTo, Dip. di Matematica "G. Peano") [Time Machine, GMAC]

M. Gramegna, M. Genovese (INRIM), L. Maccone (Univ. Pavia), S. Lyod (MIT) [Time Machine]



# Fondi

GRAVIMETRA ha beneficiato in partenza delle expertise sviluppate in ambito Gaia (DPAC, attività di analisi e processamento dei dati) e di contributi ASI per supporto a master di II livello e dottorati

Le attività di GRAVIMETRA NON sono legate all'attività DPAC in corso

Necessità di reperire fondi per gli sviluppi e le applicazioni previste

| # | Provenienza                                      | Certi 2022 (k€) | Certi 23 (k€) | Certi 24 (k€) | Presun. 2022 (k€) | Presun. 23 (k€) | Presun. 24 (k€) | Totale Certi (k€) | Totale Presunti (k€) |
|---|--------------------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| 1 | PRIN MUR PTA&Gaia                                | 0               | 0             | 0             | 0                 | 71.5            | 71.5            | 0                 | 142                  |
| 2 | Theory Grant/Antenna Astrometrica Gravitazionale | 0               | 0             | 0             | 0                 | 25              | 25              | 0                 | 50                   |
| 3 | INAF/Gaia, dottorato Galassia Relativistica      | 20              | 25            | 25            | 0                 | 0               | 0               | 70                | 0                    |

+3k per borsa master nel 2021 (GMAC)

# Criticità

- **expertise multidisciplinare** da salvaguardare e sviluppare per supportare l'avanzamento teorico, l'implementazione osservativa e il trattamento dei dati-> Theory Grant un buon inizio, ma non esaustivo..
- **non disperdere le risorse INAF** investite nella formazione e negli stage, avere dei finanziamenti target piuttosto che generali. Alcuni di questi profili potrebbero rappresentare anche una valida interfaccia con l'attività di ricerca INAF se collocati in aziende nel settore spaziale
- **sviluppo di nodi tematici all'interno dell'INAF** per consolidare e, dove necessario, raggiungere la massa critica per dare maggiore visibilità alla componente INAF coinvolta soprattutto su questioni innovative che presentano già degli ottimi risultati
- **utilizzo infrastrutture INAF**, come DPCT e la sua legacy, archivio di dati grezzi e sistema informatico per la loro calibrazione e sfruttamento scientifico anche ben al di là di quanto previsto per la missione Gaia e per le diverse sinergie con altre missioni/progetti delle altre RSN (esempio PTA)

# Criticità

- **expertise multidisciplinare** da salvaguardare e sviluppare per supportare l'avanzamento teorico, l'implementazione osservativa e il trattamento dei dati-> Theory Grant un buon inizio, ma non esaustivo..
- **non disperdere le risorse INAF** investite nella formazione e negli stage, avere dei finanziamenti target piuttosto che generali. Alcuni di questi profili potrebbero rappresentare anche una valida interfaccia con l'attività di ricerca INAF se collocati in aziende nel settore spaziale
- **sviluppo di nodi tematici all'interno dell'INAF** per consolidare e, dove necessario, raggiungere la massa critica per dare maggiore visibilità alla componente INAF coinvolta soprattutto su questioni innovative che presentano già degli ottimi risultati
- **utilizzo infrastrutture INAF**, come DPCT e la sua legacy, archivio di dati grezzi e sistema informatico per la loro calibrazione e sfruttamento scientifico anche ben al di là di quanto previsto per la missione Gaia e per le diverse sinergie con altre missioni/progetti delle altre RSN (esempio PTA)

Grazie  
dell'attenzione!