

Modelling of Star Accretion on Central Black Holes in Star Clusters

R. Spurzem and collaborators

1) Introduction

2) Star Cluster Dynamics

3) Nuclear Star Clusters (TDE)

4) Computational Instruments

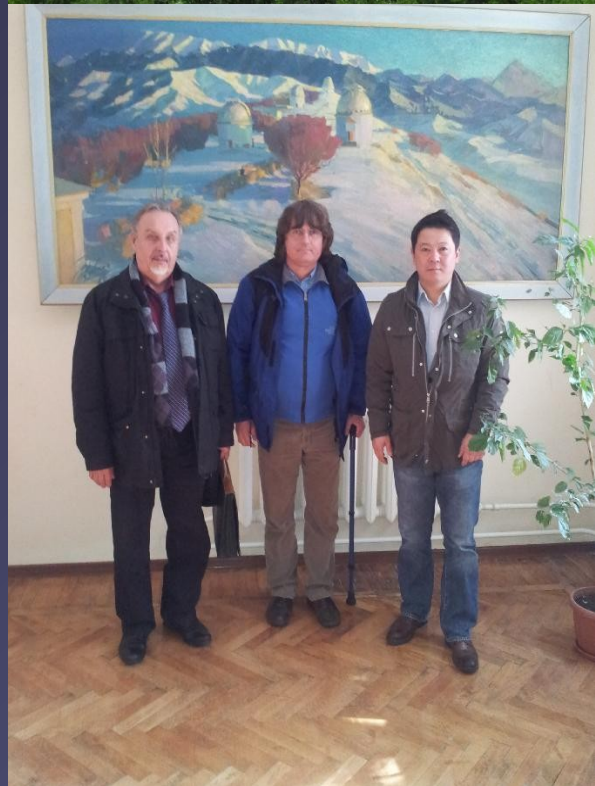
The 8th Kazakhstan-China-Korea (KCK) workshop on stellar dynamics and relativity

Kunming, China, Dec. 19-21st 2016



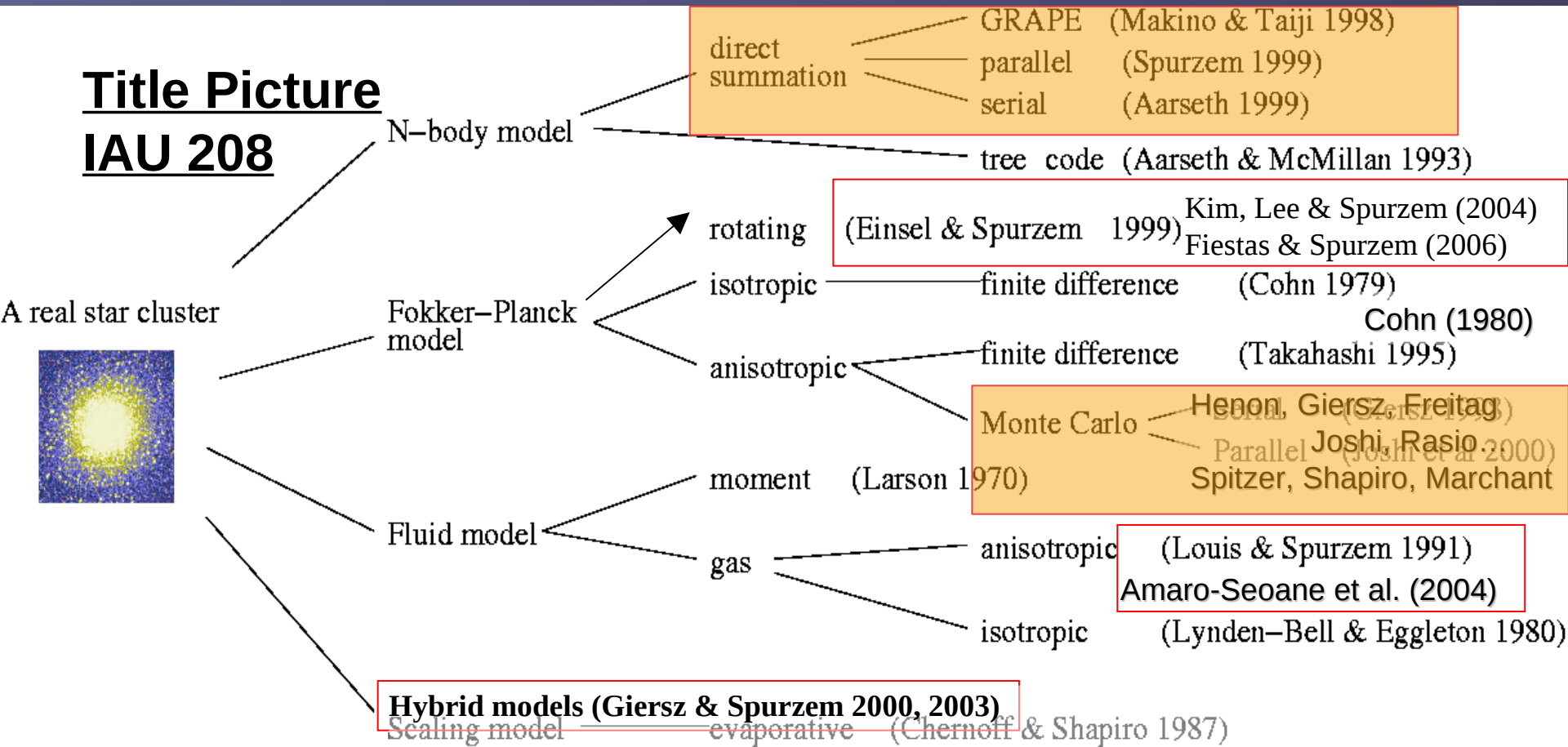


**Silk Road Impressions:
Fesenkov Astrophysical Institute
Almaty, Kazakhstan**



- 1) Introduction – History
- 2) **Star Cluster Dynamics**
- 3) Nuclear Star Clusters (TDE)
- 4) Computational Instruments

Methods for studying the evolution of globular clusters (adopted from D.C.Heggie)



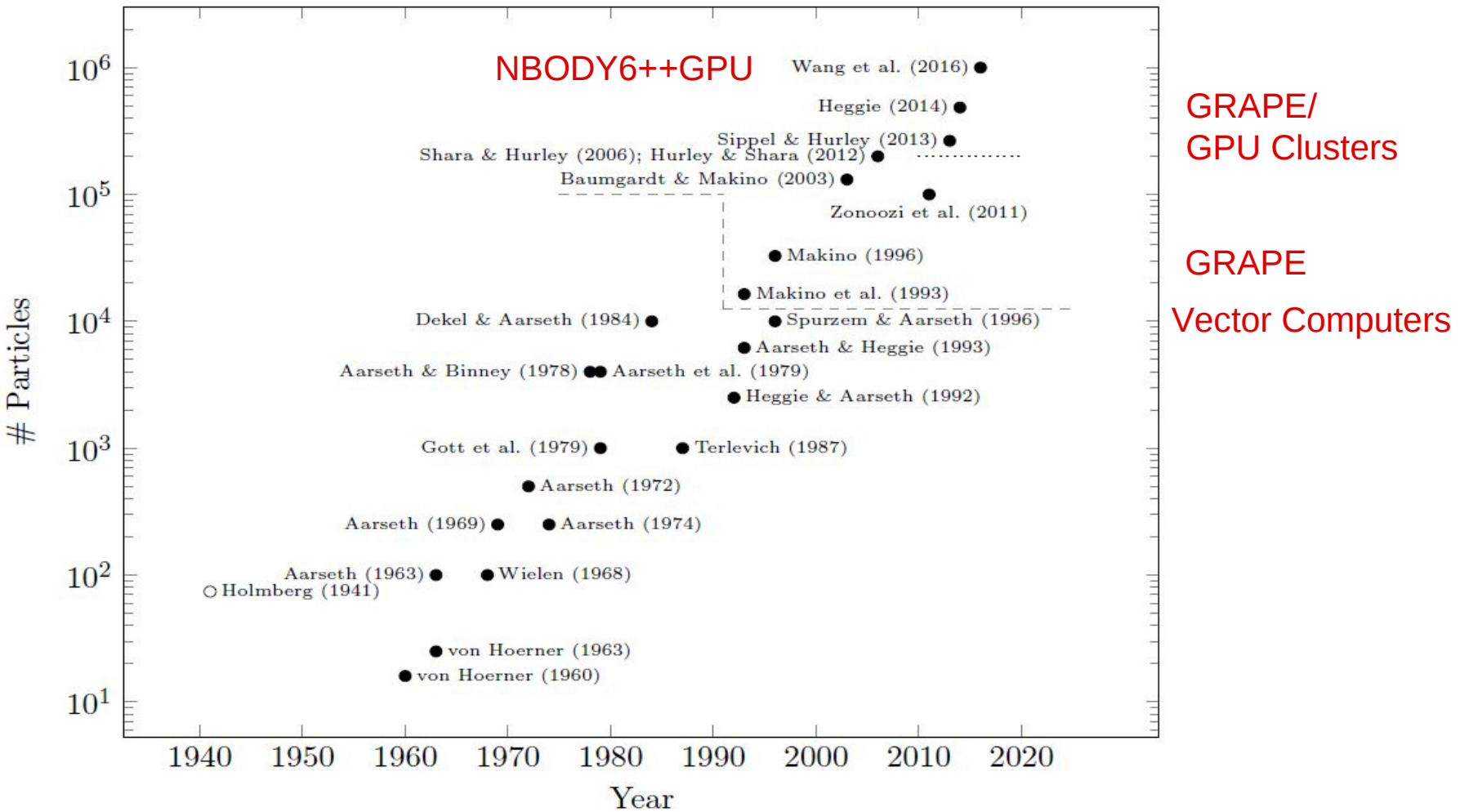
(Credit: X-ray: NASA/CfA/J. Grindlay et al.,
Optical: NASA/STScI/R. Gilliland et al.)

X-ray binaries
with neutron stars
and black holes

Globular Cluster 47 Tuc
~ one million stars

$$\vec{a}_0 = \sum_j Gm_j \frac{\vec{R}_j}{R_j^3} ; \quad \vec{\dot{a}}_0 = \sum_j Gm_j \left[\frac{\vec{V}_j}{R_j^3} - \frac{3(\vec{V}_j \cdot \vec{R}_j)\vec{R}_j}{R_j^5} \right]$$

“Moore's” Law for Direct N-Body



by D.C. Heggie Via added new cits. Sippel

DRAGON Simulation

<http://silkroad.mao.kiev.ua/dragon/>

One million stars direct simulation,

biggest and most realistic direct N-Body simulation of globular star clusters.

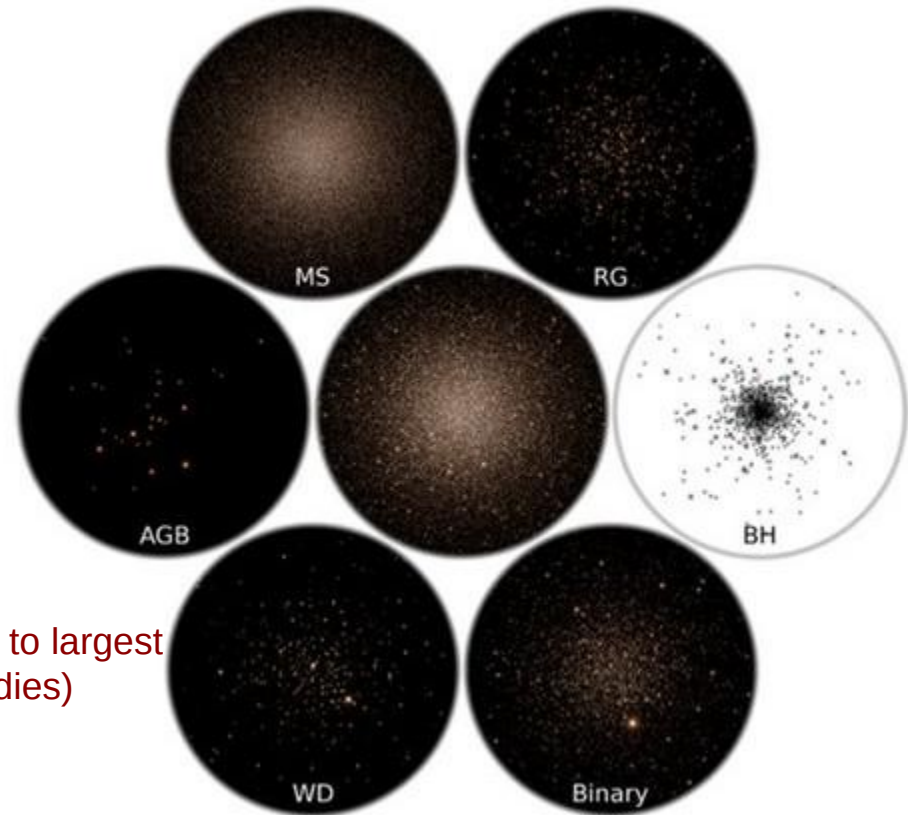
With stellar mass function, single and binary stellar evolution, regularization of close encounters, tidal field (NBODY6++GPU).

(NAOC/Silk Road/MPA collaboration).

Wang, Spurzem, Aarseth, Naab et al.
MNRAS, 2015

Wang, Spurzem, Aarseth Naab, et al.
MNRAS 2016

Number of Floating Point Operations (~1M bodies) similar to largest Cosmological simulations (Millennium, Illustris, ~100M bodies)



CPU/GPU **N-body6++**

Key Question 1. When will we see the first star-by-star N -body model of a globular cluster?

Long Wang, Ph.D. Peking University 2016:
Million-Body Award by MODEST community
And IAU Ph.D. prize

The million-body problem at last!

DRAGON GC simulation project:
million-body simulations of globular clusters

Next Generation DRAGONII Simulations ongoing/planned/started
1million/5million/10 million? New Stellar Evolution/New TDE models
Spherical Clusters: Kamlah, Shu (also PeTaR) MOCCA team et al.
Star-Disk: Fabj, Panamarev + Stardisk/Silkroad Teams

The bottle of whisky is awarded to
Long Wang (Beijing)

- Honest N -body simulation
- Reasonable mass at 12 Gyr ($\sim 5 \times 10^4 M_{\odot}$)
- Reasonable tide (circular galactic orbit will do)
- Reasonable IMF (e.g. Kroupa)
- Reasonable binary fraction (a few percent)
- Any initial model you like (Plummer will do)
- A submitted paper (astro-ph will do)

An inducement: a bottle of single malt Scotch whisky worth €50



BSE versus StarTrack: Implementations of new wind, remnant-formation, and natal-kick schemes in NBODY7 and their astrophysical consequences

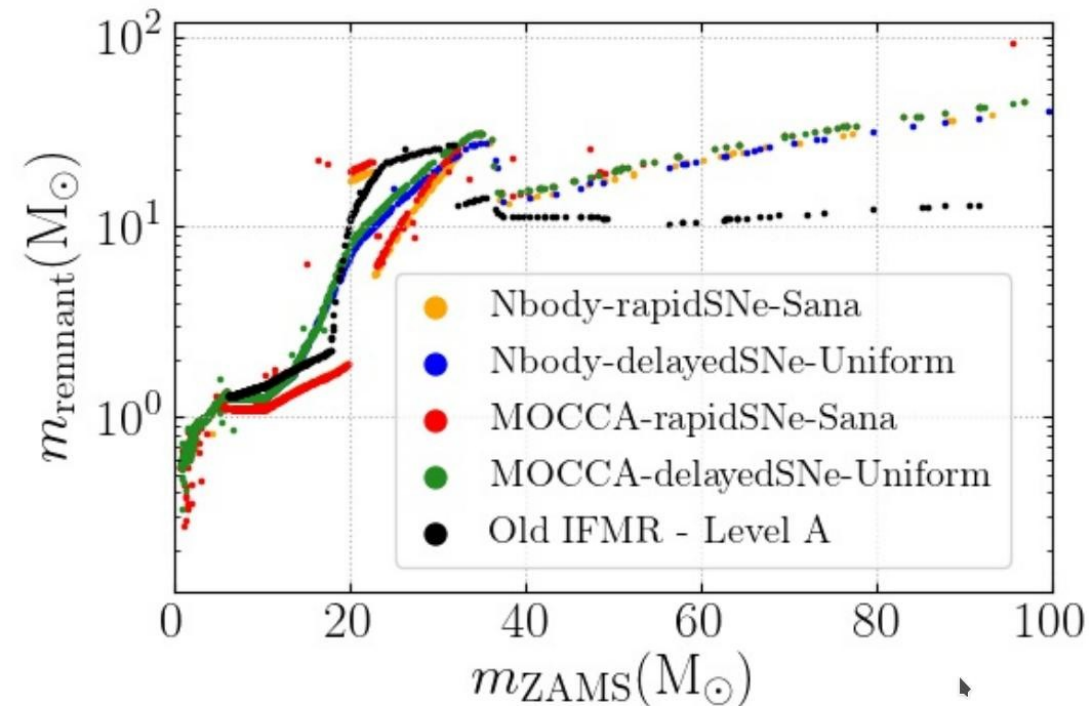
S. Banerjee^{1,2}, K. Belczynski³, C. L. Fryer⁴, P. Berczik^{5,6,7}, J. R. Hurley⁸, R. Spurzem^{5,9,*}, and L. Wang^{10,11}

A&A 2020

MNRAS 2021, subm.
In refereeing process

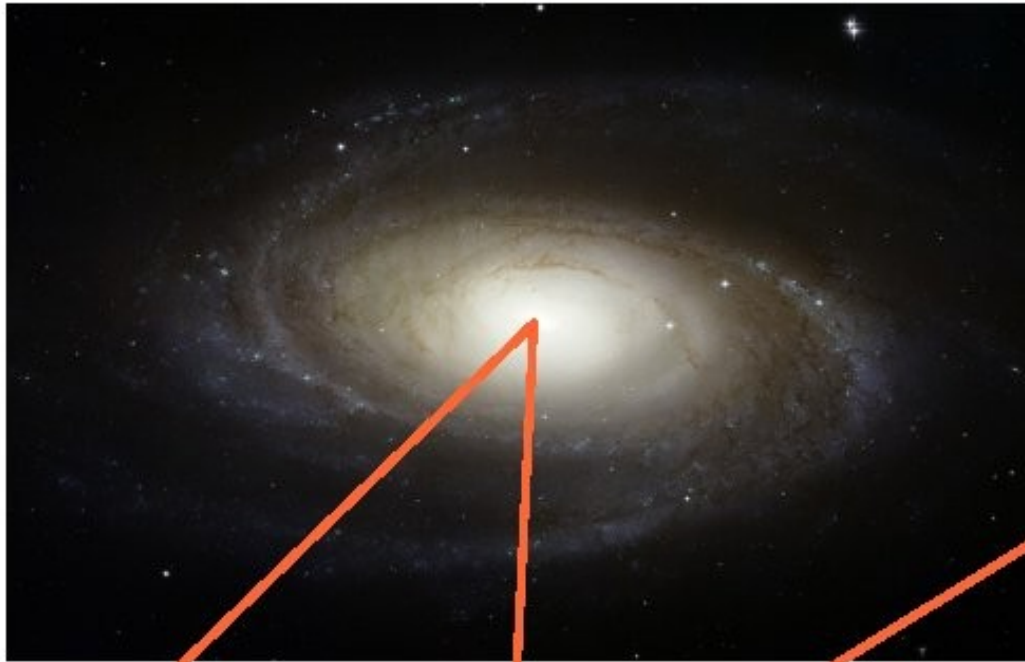
Preparing the next gravitational million-body simulations: Evolution of single and binary stars in Nbody6++GPU, MOCCA and McLuster

A. Kamlah^{1*}, A. Leveque⁵, R. Spurzem^{1,2,3}, M. Arca Sedda¹,
A. Askar⁶, S. Banerjee^{7,8}, P. Berczik^{1,2,4}, M. Giersz⁵
J. Hurley^{9,14}, D. Belloni^{12,13}, L. Kühmichel¹ and L. Wang^{10,11}

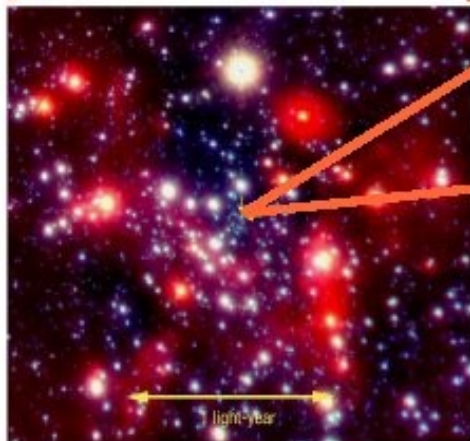


- 1) Introduction – History
- 2) Star Cluster Dynamics
- 3) Nuclear Star Clusters (TDE)**
- 4) Computational Instruments

Setting the stage: the galactic nucleus



Size ~ 10 Kpc
Density $\sim 0.05 M_{\text{sun}} \text{pc}^{-3}$
Vel. Disp. ~ 40 Km/s
Relaxation time $\sim 10^{15}$ yrs.



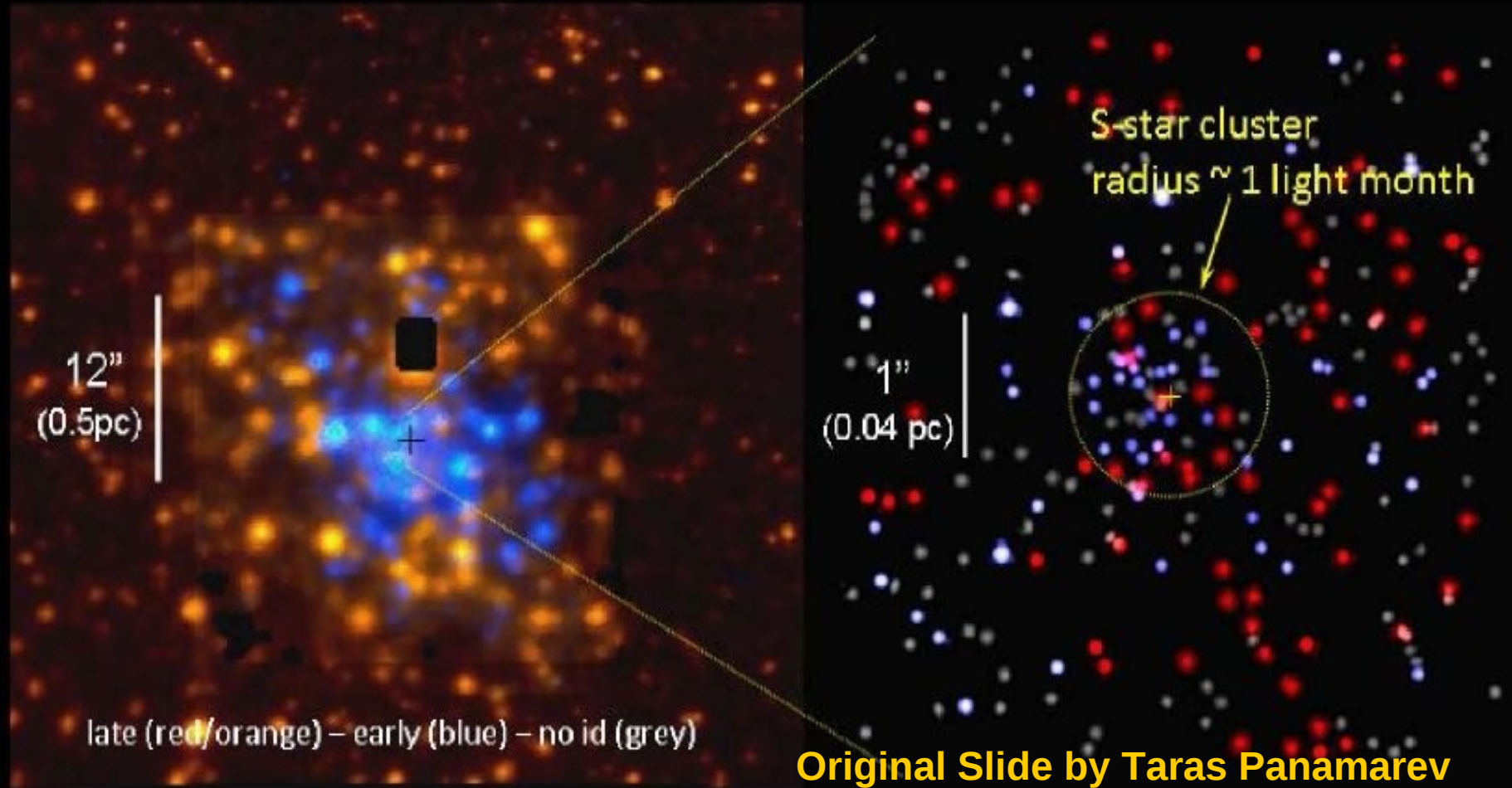
Size $\sim 1-10$ pc
Density $\sim 10^{6-8} M_{\text{sun}} \text{pc}^{-3}$
Vel. Disp. $\sim 10^{2-3}$ Km/s
Relaxation time $\sim 10^{8-9}$ yrs.

Size $\sim 10^{-7}-10^{-4}$ pc
 $R_s = 2G M_{\text{BH}} / c^2$
 $R_t \sim (\alpha M_{\text{BH}} / m_*)^{1/3} R_*$
Loss cone aperture: θ

Slide:
Miguel
Preto

Distribution of stars

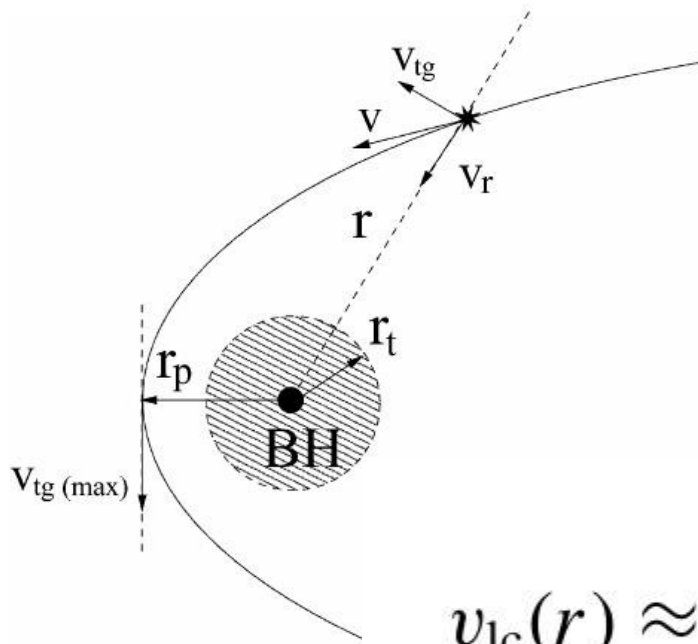
Model: Panamarev, Just, Spurzem, Berczik, Wang, Arca Sedda 2019
"DRAGON" of Galactic Center



Original Slide by Taras Panamarev

Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

See also Frank & Rees 1976, Amaro-Seoane & Spurzem 2001, Amaro-Seoane, Freitag & Spurzem 2004
All MNRAS (henceforth PAS2004)



$$r_t \propto \left(\frac{\mathcal{M}_{bh}}{x_b \pi \bar{\rho}} \right)^{1/3},$$

Tidal Radius r_t , mean star density $\bar{\rho}$,
Structure Factor x_b

$$v_{lc}(r) \approx \frac{r_t}{r} \sqrt{\frac{2G \mathcal{M}_{bh}}{r_t}} \approx \sigma_r(r) \sqrt{r_t/r}.$$

At some radius $r \gg r_t$: tangential velocity $v_{lc}(r)$; $\sigma_r(r)$: radial velocity dispersion.
theta_{lc} opening angle of “loss cone”: theta_{lc} ~ v_{lc}/σ_r

Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really?
a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

$$\Omega \approx \frac{v_{\text{lc}}^2}{\sigma_t^2} \approx \frac{r_t}{r}.$$

$$\Omega = \theta_{\text{lc}}^2 / 4$$

$$\theta_{\text{D}}^2 = \frac{t_{\text{out}}}{t_{\text{relax}}}.$$

t_{out} (= t_{cross} here):

Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

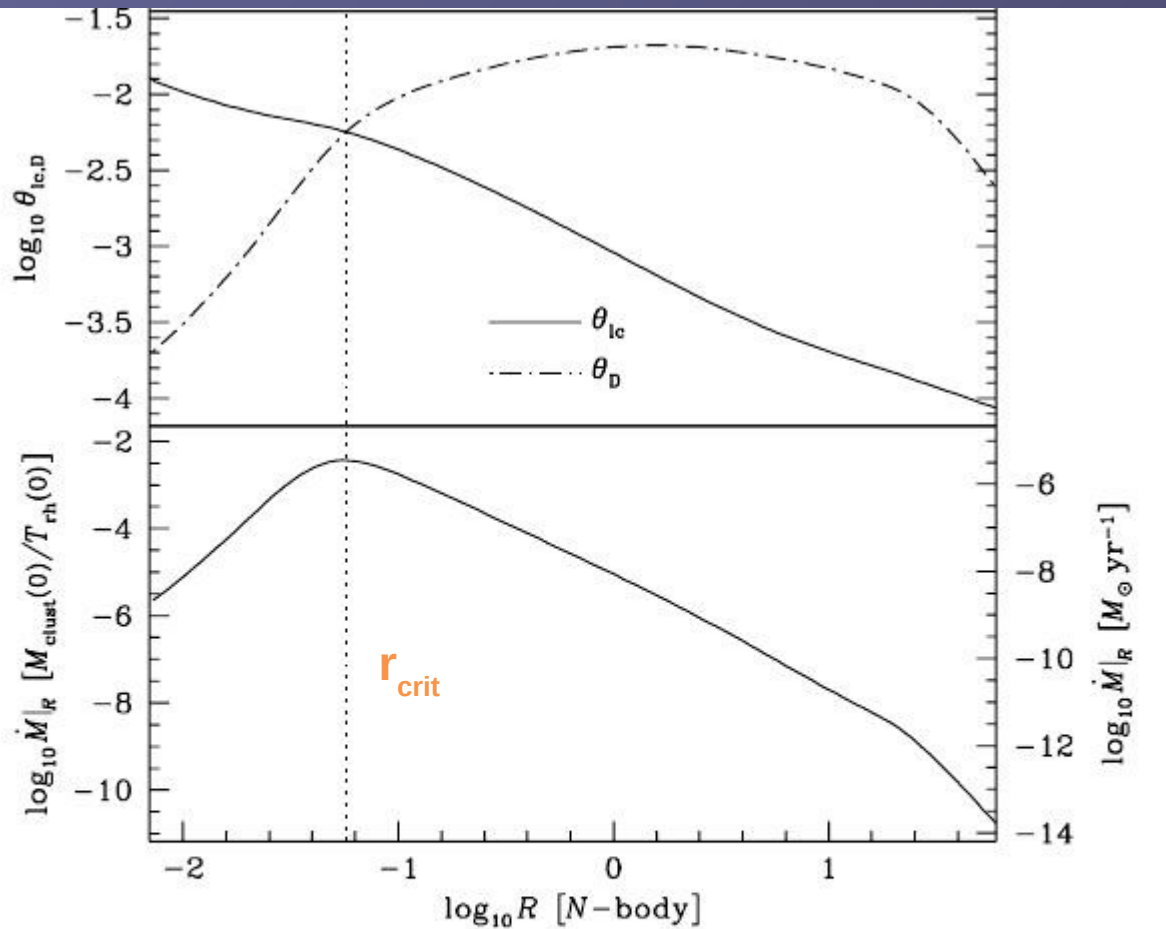
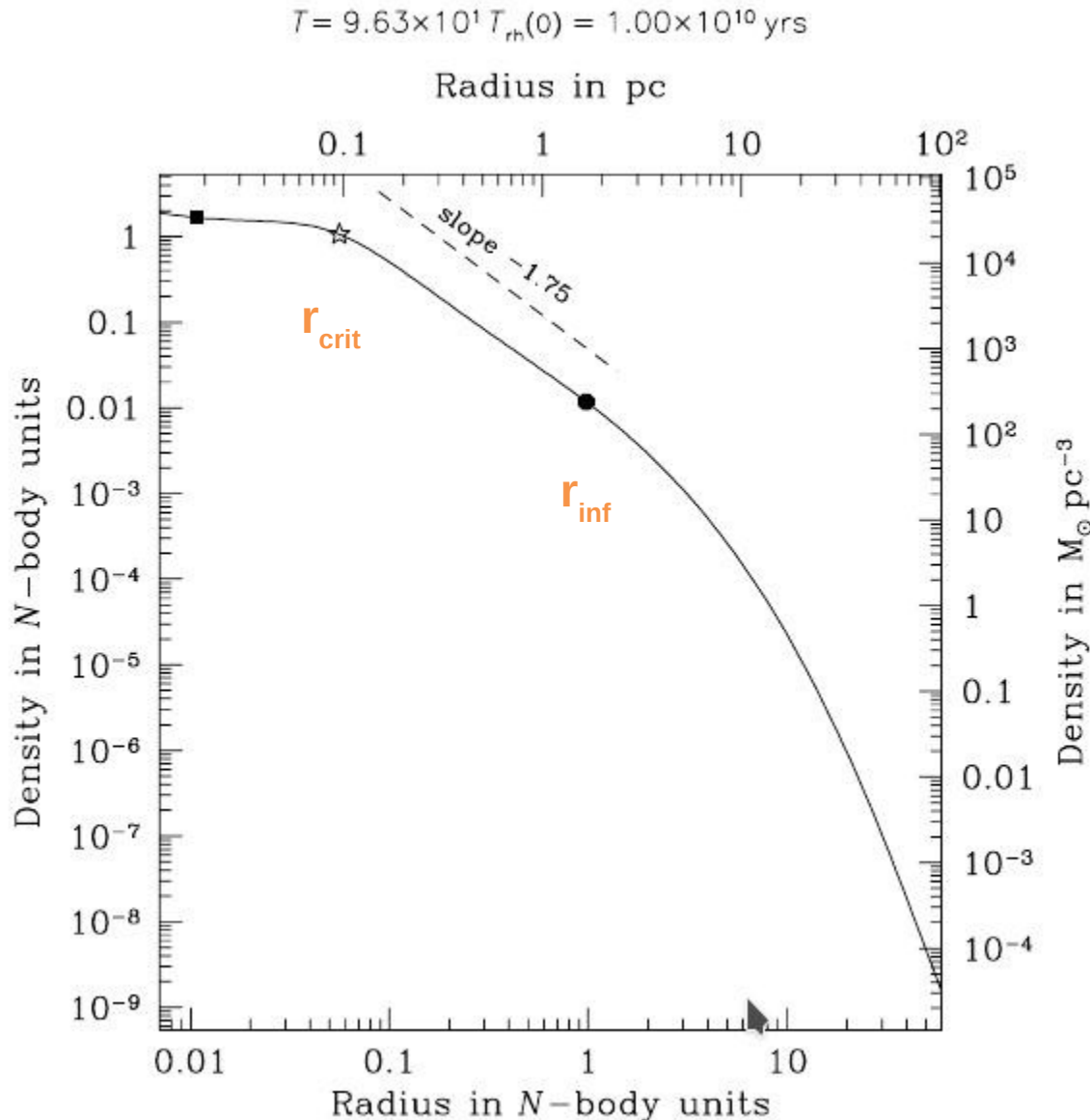


Figure 13. In this triple diagram we evince the dependence on radius of the mass accretion rate, the loss-cone and diffusion angles which are related to the filling and depletion time-scales of the loss cone (see text) and the filling factor K . The critical radius is defined by the condition $\theta_D = \theta_{lc}$ (dashed line).

$$\dot{M}_{bh} \simeq \frac{\rho(r_{crit}) r_{crit}^3}{t_{relax}(r_{crit})},$$

Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

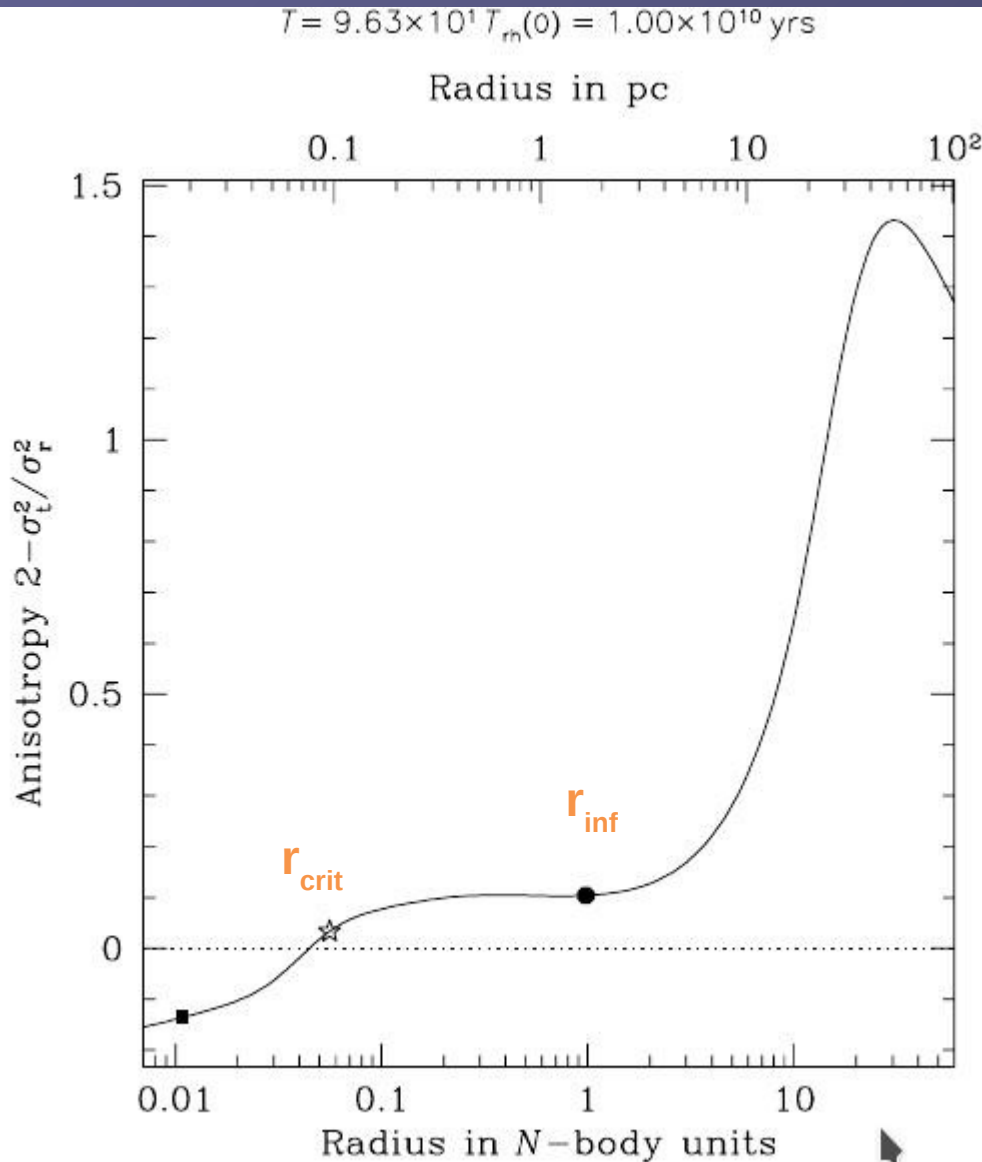


PAS2004:

Typical density
power-law created:
Bahcall-Wolf (1976)
(BW Cusp)
Also found by
Frank & Rees (1976)
Shapiro & Lightman
(1977)

Note flattening
Inside r_{crit} !

Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)



PAS2004:
Anisotropy
Generation

> 0 :
more radial
motion

< 0 :
more tangential
motion

unconfirmed
by N -body

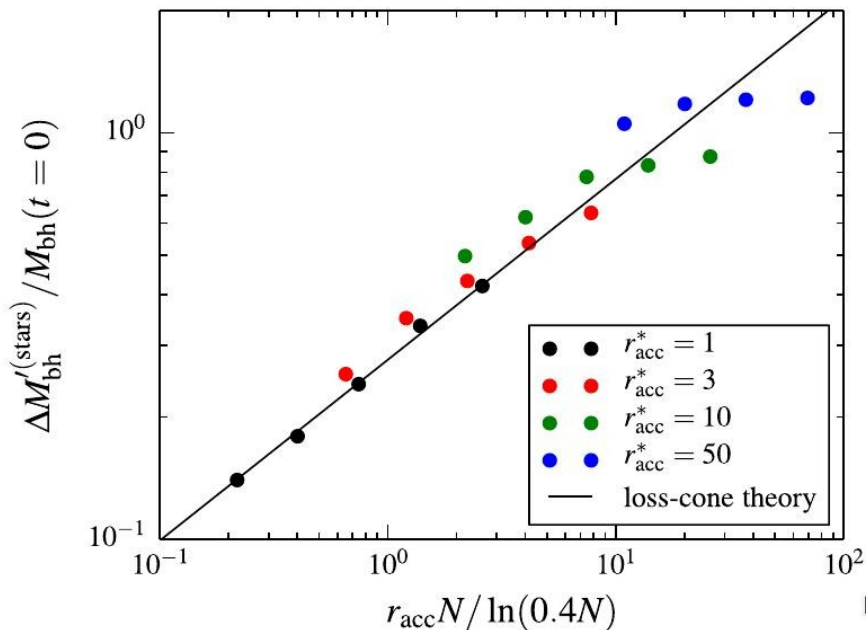
Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

$$r_{\text{crit}} \propto \left[r_{\text{acc}} \frac{N}{\ln \Lambda} \right]^{4/9} M_{\text{bh}}^{1/9} .$$

Dimensionless
Black Hole
Growth rate:

$$k \left[r_{\text{acc}} \frac{N}{\ln(0.4N)} \right]^{4/9} M_{\text{bh}}^{10/9} .$$

Kennedy et al. 2016 (see also Brockamp, Baumgardt et al. 2011)



Method used for scaling
to real systems:
 r_{acc} and N parameter
(e.g. Li et al. 2018, ...)

Figure 11. Mass growth of the MBH relative to its initial mass after two relaxation times for all models without a gas disc (i.e. the evolution is purely stellar dynamics); the horizontal axis is a combination of the numerical accretion radius r_{acc} and particle number N . The solid line shows the best-fitting power law with index of 4/9 to the models with $r_{\text{acc}}^* = 1$ only (filled black circles), as expected from loss-cone theory (equation 21). Other coloured circles represent different values of r_{acc}^* as indicated by the legend.

Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

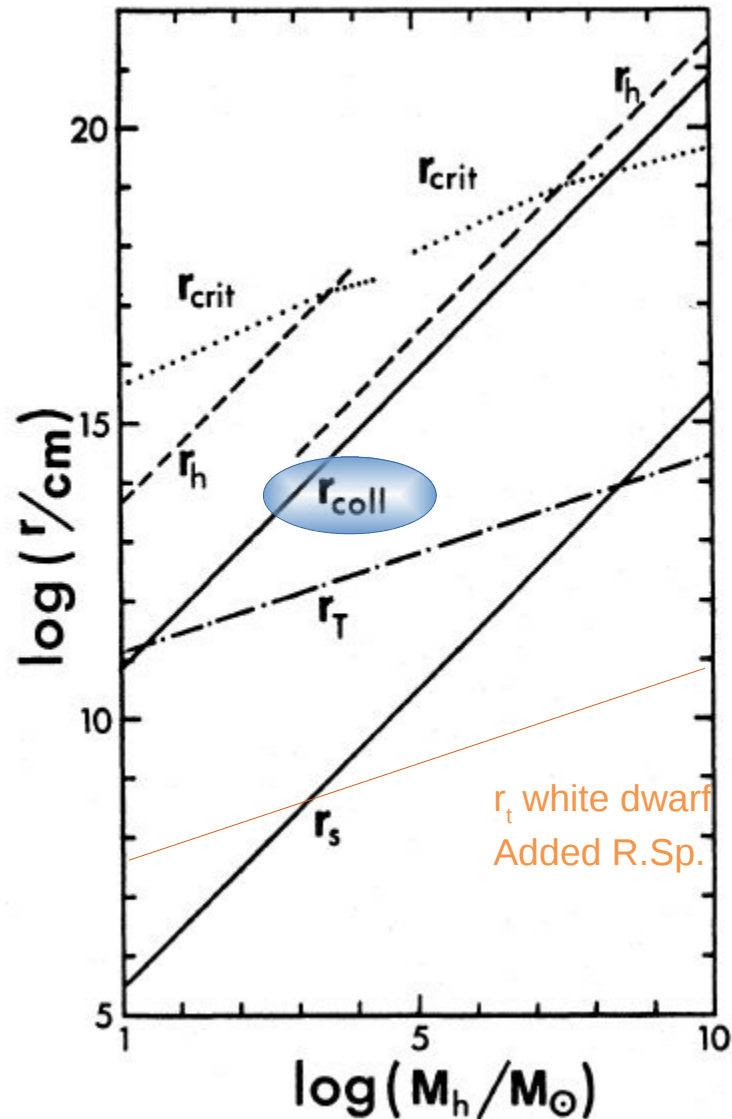
On Tidal Disruption
of Stars around
(supermassive)
black holes
(From Frank & Rees 1976)

Note:

For Black Holes,
white dwarfs, neutron
stars, r_t does not
exist or is very small

→

Direct accretion or
Post-Newtonian
inspiral happens!



Star “Accretion” onto Black Holes – what happens really? a.k.a Tidal Disruption Event (TDE)

Current and Future Issues:

- Partial Accretion (Internal Structure, Giants)
- Stellar Collisions (Vilkoviski, Chilean collaboration)
- White Dwarfs
- Neutron Stars/Stellar Mass Black Holes Inspiral
- Axisymmetric Systems
- Star-Disk Interactions (Czerni & Vilkoviski 2002, Just et al. 2012, Kennedy et al. 2016, Panamarev et al. 2018, Fabj et al. in prep.)
- Fate of Massive Objects Growing
(Rizzuto, Arca Sedda et al. 2020, 2021)
- Role of resonant relaxation?

Upgrade of Stellar Evolution,

- see e.g. Banerjee et al. 2020, Kamlah et al. 2021

- 1) Introduction – History
- 2) Star Cluster Dynamics
- 3) Nuclear Star Clusters (TDE)
- 4) *Computational Instruments*

Kupi, G., Amaro-Seoane, P., Spurzem, R., Dynamics of compact object clusters: a post-Newtonian study, 2006, MNRAS 371, L45

Berentzen, I., Preto, M., Berczik, P., Merritt, D., Spurzem, R., Binary Black Hole Merger in Galactic Nuclei: Post-Newtonian Simulations, 2009, ApJ 695, 455



Super-Rechner spürt Schwarzen Löchern nach

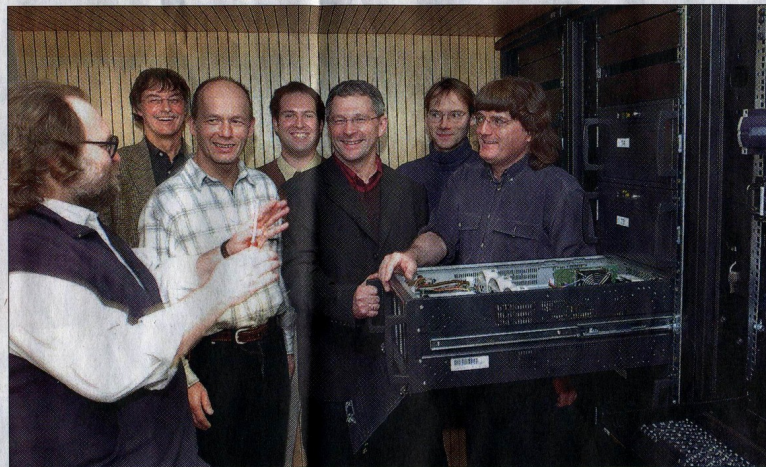
Astronomisches Rechen-Institut stellte mit „Grace“ einen der schnellsten Rechner der Welt vor – 3200 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde

Von Harald Berlinghof

Schon ein ganz durchschnittliches dieser gefräßigen, schwarzen Ungeheuer des Universums, die oft in den Zentren der Galaxien hausen, wäre ein furchteinflößendes Etwas, könnten wir ihm je begegnen. Sie sind zwar dunkle Mysterien des Kosmos, doch unnahbar sind sie nicht. Vielmehr zerren sie sogar gerne alles an sich, um es sich einzuverleiben. Schwarze Löcher sind ausgenutzte, kollabierte Sterne, deren Brennstoff nicht mehr ausreicht, um sie strahlen zu lassen. Unter ihrem eigenen Gewicht brechen sie in sich zusammen und bilden eine gewaltige Masse, die solche Gravitationskräfte ausübt, dass nichts, was einmal den sogenannten Ereignishorizont überschritten hat, je wieder zurück kehren kann – noch nicht einmal Licht.

Wie gesagt, dies gilt für ganz normale Schwarze Löcher. Im Astronomischen Rechen-Institut (ARI) der Universität Heidelberg wagt man sich aber inzwischen sogar an sogenannte „supermassive Schwarze Löcher“ heran – rein rechnerisch natürlich. „Das sind Schwarze Löcher mit einer Masse vom mindestens einer Million Sonnenmassen und der Größe unseres gesamten Sonnensystems“, erklärt Professor Rainer Spurzem vom ARI.

In Computersimulationen wird berechnet, was passiert, wenn zwei Galaxien, die solche supermassiven Schwarzen Löcher in sich tragen, miteinander kollidieren. Millionen von



Am Astronomischen Recheninstitut stellten Mitarbeiter ihren neuen schnellen Rechner vor, der auf der Suche nach den Gravitationswellen helfen soll. Von der Rechenkraft gehört er in die Top 50 der schnellsten Rechner auf der Welt, obwohl er nur aus einfachen PCs zusammengebaut ist.

Foto: Kresin

Sonnen und Planetensystemen kommen sich dann so nahe, dass die gegenseitigen Anziehungskräfte die jeweiligen Bahnen der Sonnen verändern und beide Galaxien in starke Drehbewegungen und rotierende Verwirbelungen versetzen. Aus den beiden kollidierenden Spiralgalaxien entstehen kurzzeitig – für wenige Millionen Jahre – sogenannte Antennengalaxien – so bezeichnet wegen ihrer Form.

Berechnen muss man solche hochkomplexen Ereignisse freilich mit einem Superrechner. Und im Astronomischen Rechen-Institut hat man mit der finanziellen Hilfe der Volkswagenstiftung, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Land Baden-Württem-

berg sowie des Hardware-Know-Hows der Informatik der Mannheimer Universität am Lehrstuhl von Professor Reinhard Männer aus 32 Hochleistungs-PCs einen Top-50-Rechner namens „Grace“ konstruiert, der zu den schnellsten Rechnern der Welt zählt.

So richtig schnell machen ihn spezielle Grafikkarten namens „Grace“ aus Japan und solche aus Mannheim mit Namen „MPRace“. 3200 Milliarden Rechenoperationen in der Sekunde sind die Folge. „Ein Rechner für 20 Millionen Euro bringt auch nicht mehr“, so Spurzem. Allerdings schafft es Grace nicht in die Welttrangliste der schnellsten Rechner, weil er ein Spezialist ist, der nur auf dem Problem der Gravitationsberechnung funktioniert. In anderen Bereichen würde er kläglich versagen.

Im Jahr 1937, also bevor Computersimulationen möglich waren, weil Konrad Zuse den Computer erst später erdachte, hatte der Forscher Erk Holmberg die Entstehung der „Antennengalaxien“ beim Zusammenstoß zweier Spiralgalaxien bereits aufgezeigt. Seine mechanische Methode brachte ein ähnliches Ergebnis hervor wie der Rechner „Grace“. Doch „Grace“ hat noch etwas anderes berechnet.

Der Zusammenschluss zweier supermassiver Schwarzer Löcher erfolgt viel schneller als bisher vermutet – sie benötigen nur rund 100 Millionen Jahre, um zu verschmelzen und dabei starke Gravitationswellen auszusenden. Könnte man die Gravitationswellen nachweisen, wäre der letzte große Lückenschluss in Einsteins Relativitätstheorie gelungen.

Maybe he detects gravitational waves with this?

VolkswagenStiftung

Miro „schnappt“ zwei Einbrecher

Der Polizeihund erschnüffelte in Wieblingen die Männer, die sich im Keller versteckt hatten

POLIZEI-BERICHT

Zwei verletzt



中国科学院国家天文台

National Astronomical Observatories, CAS

the SILK ROAD PROJECT at NAOC

丝绸之路计划

GPU Clusters used:

老虎 Beijing (NAOC/CAS and Silk Road Project)

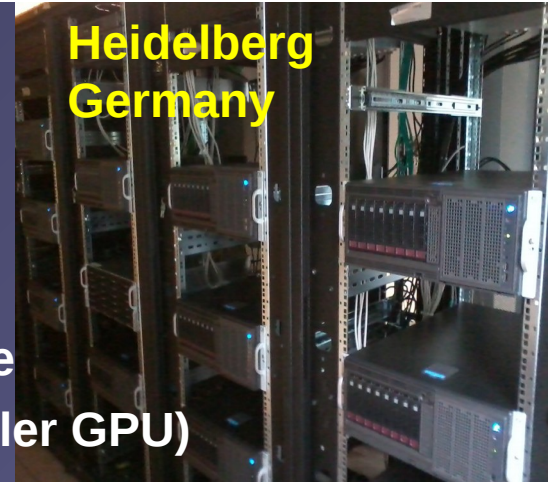
85 Nodes, 64 Kepler K2

JURECA GPU Partition (75x 2x Kepler K80 GPU)

Golowood cluster, Main Astron. Observatory, Kiev, Ukraine

Kepler/bwFor clusters Heidelberg, Germany (12x +18x Kepler GPU)

Max-Planck MPCDF GPU cluster (Kepler K20 GPUs)



Heidelberg
Germany



Kiev,
Ukraine



老虎
NAOC Beijing

2009/11/19



JUWELS Juelich GPU
Cluster Germany