

Universidade Federal do Paraná
Departamento de Física
Bacharelado em Física
Introdução a Pesquisa II - CF 375

Estudo da passagem de estrelas próxima ao Sol e seus efeitos gravitacionais em asteroides localizados na nuvem de Oort

Aluno: Ariel Vinícius Cordeiro Kollross

Professor: Dr. Dietmar William Foryta

Curitiba
2019

Sumário

1	Introdução	2
2	Revisão bibliográfica	2
2.1	Nuvem de Oort	2
2.2	Passagens de Estrelas	4
2.3	Massa-Luminosidade	8
3	Objetivo	9
4	Metodologia de pesquisa	9
4.1	Metodologia empregada	10
5	Análise e Resultados	12
6	Conclusão	14
7	Assinaturas	14

1 Introdução

Acreditamos que o sistema solar, formou-se a partir do adensamento gravitacional, de uma região de um nuvem de gás e poeira. Conforme o desenvolvimento do Sol, os planetas e outros corpos foram formados a partir de colisões e aglutinamento de matéria. Dessa forma, surgiram os planetas e planetesimais. Com a influência gravitacional dos planetas gasosos, vários corpos menores tiveram suas trajetórias modificadas, e foram lançados para regiões remotas do sistema solar, consequentemente formando uma nuvem de cometas, a qual chamamos de Nuvem de Oort. Esta nuvem se estende por milhares de unidades astronômicas e funciona como um reservatório de cometas. Estes cometas possuem majoritariamente orbitas circulares, entretanto, alguns tipos de perturbações podem fazer com que estas orbitas se tornem elípticas ou hiperbólicas, como por exemplo, a força de maré galáctica, a passagens de nuvens gigantes moleculares ou a passagem de estrelas.

O Sol encontra-se quase na periferia da via láctea, uma região não muito povoada por outras estrelas se comparado à outras regiões da galáxia, contudo, ele ainda é vizinho de muitas estrelas. Atualmente, Próxima Centauri é a estrela mais próxima do Sol, à uma distância de 4,2 anos luz. Entretanto, nem sempre foi assim. No passado, outras estrelas ocuparam esta posição de “mais próxima”, assim como no futuro, serão outras, já que as estrelas estão em constante movimento, devido a dinâmica da galáxia.

Dependendo da velocidade e massa da estrela que se aproxima do Sol, ela pode afetar de forma significativa os corpos que pertencem a nuvem de Oort, modificando as orbitas a ponto de manda-lós para dentro do sistema interno de planetas, inclusive cruzando com a orbita da Terra.

O objetivo deste trabalho, é estudar a passagens de estrelas próximas ao Sol e verificar o impacto que estas teriam na nuvem de Oort, por meio de análises estatísticas. Para isto, pretende-se realizar uma simulação computacional para determinar estes possíveis eventos.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Nuvem de Oort

Acredita-se que o sistema solar formou-se a partir de um disco de gás e poeira em rotação. Devido à alguma instabilidade nesta nuvem, surge uma região mais densa, que passa a acumular matéria e por consequência, a esquentar. Esta região vai se adensando, e assim, passa a formar uma proto-estrela. Ao redor da proto estrela, estava ocorrendo a aglutinação da matéria devido a colisão entre partículas. Portanto novos corpos estavam em processo de formação, como cometas, planetas e luas. Conforme os planetas surgiam, principalmente os gasosos, estes acabavam espalhando planetesimais para diversas regiões do sistema, criando assim, regiões ou depósitos de asteroides e cometas.[1] [2].

Existem duas regiões conhecidas de reservatório de cometas. São o cinturão de Kuiper e a nuvem de Oort. O cinturão de Kuiper, consiste em dois grupos, os KBOs clássicos, que localizam-se à uma distância de 30-50AU e possuem orbitas mais circulares, e os KBOs dispersos, que localizam-se à uma distância de 35-200AU e possuem orbitas mais elípticas. Estes dois grupos possuem orbitas na mesma direção do plano da eclíptica. Já a nuvem de Oort, detém a maior parte dos cometas do sistema solar. Não se sabe com precisão, o tamanho da nuvem de Oort, todavia acredita-se, que ela se estende por no mínimo 5×10^4 AU. Os cometas da nuvem de Oort, possuem uma distribuição esférica em torno do Sol, formando assim uma espécie de nuvem de cometas [2]. A maioria dos cometas que integram a nuvem de Oort, possuem orbita circular. Entretanto, a colisão de dois cometas, assim como, a passagem de uma nuvem molecular, ou de uma estrela próxima, pode fazer com que os cometas mudem de orbita. [3] [5].

Em 1950 Oort apresenta em seu trabalho, a existência de cometas de longos períodos, com semi eixo maior (a) acima de 10^4 AU,

They must then form a huge cloud, extending, according to the numbers cited above to distances of at least 150 000 AU., and possibly still futher... [3]

De acordo com Oort, os cometas de longos períodos, vão desaparecer dentro de 1 a 2 milhões de anos, após a sua primeira passagem próxima ao Sol. Devido a isto, é improvável que os cometas que observamos atualmente, tenham sido originados nos últimos 2 milhões de anos. De forma que, eles já existiam, e foram “trazidos”, devido à algum efeito perturbativo, como expresso neste trecho:

As it is highly improbable that the comets we observe have only originated within the last two million years we are led to conclude that comets already existing outside the region where they are subject to the perturbing action of the sun and planets are continually being brought into this reagion.[3]

Oort também comenta sobre a relação da interação gravitacional dos cometas de longo período com Júpiter, sendo que a perturbação em suas orbitas ocorre paulatinamente, de forma que, ao longo de muitos anos de interação, estes cometas gradualmente desapareçam, colidindo, ou sendo expelidos para o espaço interestelar. Oort ainda afirma, que cometas de orbitas circulares na nuvem estão sujeitos à perturbações estelares, de modo que, esta interação afeta a trajetória deles.[3]

Para determinar como a passagem de estrelas pode afetar a trajetória dos cometas, Oort [3] apresenta a seguinte equação,

$$\Delta V = \frac{2Gm}{DV_{rs}} \quad (1)$$

sendo, ΔV a alteração na velocidade do cometa. G é a constante gravitacional, m é a massa da estrela perturbadora, V_{rs} é a velocidade relativa da estrela em relação ao Sol. D é a distância de maior aproximação entre o cometa e a estrela. Oort ainda mostra que a equação para máxima aproximação da estrela é dado por,

$$\Delta V^2 = \left(\frac{2Gm}{DV_{rs}} \right)^2 \frac{r^2}{r^2 + D^2 - 2rD \cos \alpha}. \quad (2)$$

Como resultado dos cálculos apresentados no artigo de Oort, averiguou-se que a passagem de estrelas próximas coloca um limite ao tamanho da nuvem de Oort, de aproximadamente $2 \times 10^5 \text{ AU}$. Pois a partir desta distância, a gravidade do Sol é irrisória, e praticamente todos os cometas afetados por uma estrela com massa aproximada do Sol serão ejetados da nuvem, ficando apenas uma pequena fração de cometas. De forma que, durante uma simulação de 3×10^9 anos, 5% dos cometas no raio de $r = 1 \times 10^5 \text{ AU}$ e 9% para um $r = 2 \times 10^5$ dos cometas expelidos, .

Na formação da nuvem de Oort, diversos trabalhos de simulação apontaram que, Netuno e Urano possuem um importante papel de espalhar planetesimais para ocupar a região da nuvem, enquanto que Júpiter e Saturno, são planetas que mais facilmente ejetam planetesimais do sistema solar, devido a sua alta massa. De acordo com as simulações, apresentadas, a formação da nuvem de Oort, começa a acontecer por volta de 10M anos. Com 100M anos a 1G anos, a nuvem de Oort continua sendo formada. Os encontros estelares tem papel, em alongar, e aumentar o semi-eixo maior dos cometas, assim, como modificar sua inclinação do plano da eclíptica. Depois de 10M anos de simulação, partículas distantes de $3 \times 10^4 \text{ AU}$, sofrem influência gradativa da força de maré galática e passagens de estrelas, de forma que adquirem uma distribuição isotrópica da inclinação. Assim como a passagem de estrelas também podem afetar os cometas, de tal modo, que adquiram orbitas hiperbólicas e acabam deixando o sistemas solar.[4]

Assim como Oort, Dones [5] prevê os seguintes efeitos, para passagens de estrelas próxima à nuvem de Oort,

In addition, stars will occasionally pass directly through the Oort cloud, ejecting some comets and severely perturbing the orbits of others (Hills 1981). A star passage drills a narrow tunnel through the Oort cloud, ejecting all comets within a radius of $\approx 450 \text{ AU}$, for a 1 sun mass star passing at a velocity of 20 kms^{-1}

(Weissman 1980b). *Over the history of the solar system, Weissman estimates that passing stars have ejected about 10% of the Oort cloud population. The ejected comets will all be positioned close to the path of perturbing star, as well as many of the comets which are thrown into the planetary system in a "cometary shower"* (Weissman 1980b, Dybczynski 2002a,b).

Dones ainda comenta que, as perturbações das passagens de estrelas e nuvens moleculares, são menos efetivas que a perturbação da força de maré galáctica, pois, a maioria dos encontros de estrelas próximas, ocorre com estrelas de baixa massa ($\approx 0.4M_{\odot}$), e a passagem de nuvens moleculares, são raras para nossa localização. [5]

O tempo de vida dos cometas na nuvem de Oort, corresponde a 60% da idade do sistema solar. Isto leva à conclusão de que a nuvem de Oort precisa ser reabastecida com a captura de cometas do meio interestelar, contudo, este não é um processo eficiente. Houve então o surgimento de outra hipótese, que o abastecimento da região externa da nuvem de Oort, é acrescida por um reservatório interno, localizado em uma região do interior da nuvem. Ainda prevê-se que, a nuvem de Oort possua uma massa equivalente à 100 a 200 massas da terra [5]. No entanto, verificamos que existe uma grande divergência entre os valores de massa atribuídas nuvem de Oort.

2.2 Passagens de Estrelas

Oort em 1950, foi um dos primeiros a considerar que a passagem de estrelas poderiam perturbar a nuvem de cometas, que em homenagem recebeu seu nome.

De acordo com Weissman, que apresentou o resultado de uma simulação, a qual utilizou o método de Monte Carlo para construir uma nuvem de Oort. Utilizando a mesma formula de cálculo que Oort, a equação 1. A imagem 1 mostra o resultado obtido no artigo de Weissman, para uma estrela de $1M_{\odot}$, com velocidade de 30kms^{-1} para uma nuvem de 2×10^7 cometas e uma máxima aproximação (D) de 10^4AU [6].

A figura 1a, mostra os cometas ejetados para o meio interestelar, vista de cima do percurso da estrela, a figura 1b, mostra os cometas ejetados, visto ao longo do percurso. a figura 1c e d, mostram a região planetária afetada pela passagem da estrela, para uma distância de periélio de $q < 10\text{AU}$, a primeira com visão de cima do percurso da estrela e a segunda, com a visão ao longo do caminho. Os resultados da simulação, predizem uma fração de perda de cometas que foram ejetados de $8,5 \times 10^{-5}$, do total da população da nuvem. Weissman também relata que a região interna da nuvem de Oort, é mais difícil de ser afetada pela passagem de estrelas. O autor ainda estima que a cada encontro desse tipo, é retirada uma fração de 9% da população total da nuvem de Oort.

Hills em 1981, demonstra em seu trabalho, que a passagem de estrelas próximas pode causar uma perturbação na nuvem de Oort, a qual manda uma "chuva de cometas" da região interna da nuvem de Oort para a região planetária do sistema solar. [8]

Em [7] mostra que, a frequência de encontros estelares pode ser calculada a partir de

$$N = \pi R^2 V T \rho_s, \quad (3)$$

sendo N o número de encontros, V é a velocidade relativa do Sol em relação ao grupo local de estrelas, ρ_s é a densidade local de estrelas, R é o raio em relação ao sistema solar, para o qual, quer estimar a quantidade de passagens, por fim, T é o tempo de análise. Para $V = 20\text{kms}^{-1}$, $\rho_s = 0.08\text{pc}^{-3}$, $R = 1\text{pc}$ e $T = 4,6 \times 10^9\text{anos}$, o que resulta em $2,3 \times 10^4$ encontros com estrelas à 1pc ou menos, o que dá em média, um encontro a cada $2,0 \times 10^5\text{anos}$.

Em 1997, Sanchez, realiza um levantamento utilizando o catalogo de Hipparcos, para determinar estrelas que tenham passado ou irão passar suficientemente próximas, e que possam causar alguma perturbação na

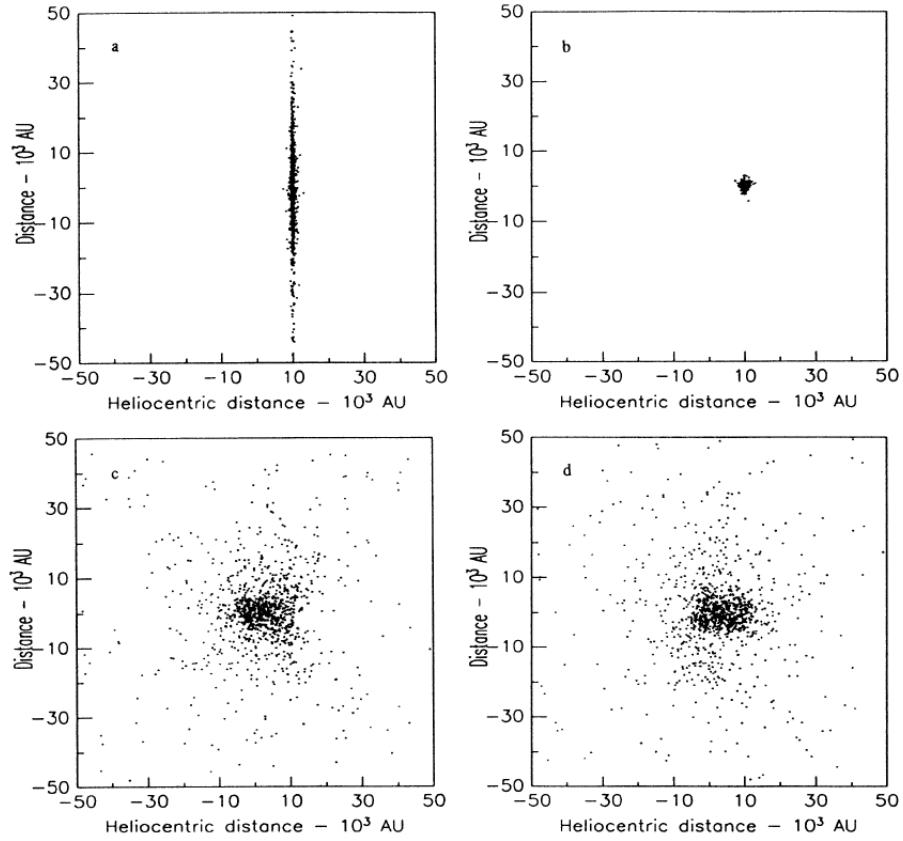


Figura 1: Imagem retirada de [6], que mostra a localização dos cometas em uma nuvem de Oort hipotética, gerada em simulação numérica, e seus vários estágios de perda de cometas. A figura 1a, mostra os cometas ejetados para o meio interestelar, vista de cima do percurso da estrela, a figura 1b, mostra os cometas ejetados, visto ao longo do percurso. a figura 1c, mostra a região planetária afetada pela passagem da estrela, para uma distância de periélio de $q < 10\text{AU}$, com visão de cima do percurso da estrela. Por fim a figura 1d mostra a região planetária afetada pela passagem da estrela, para uma distância de periélio de $q < 10\text{AU}$ para a visão ao longo do caminho.

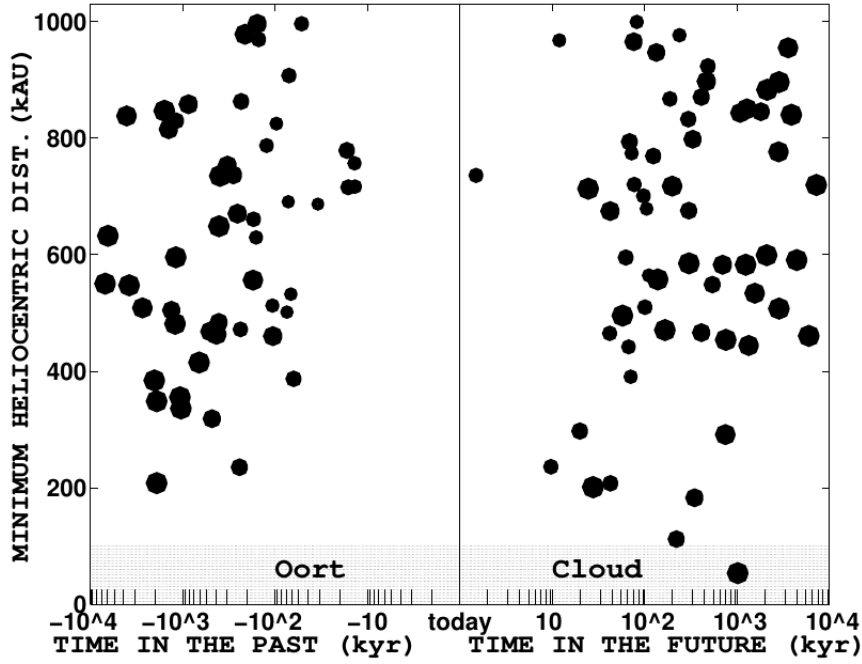


Figura 2: Imagem retirada do artigo[9] O gráfico representa os resultados para a passagens de estrelas próximas, onde temos o Sol centrado na origem em cada instante de tempo, a nuvem de Oort considera tem 100kAU e a magnitude aparente das estrelas é proporcional ao tamanho dos pontos.

nuvem de Oort. De acordo com o trabalho, perturbações significativas são possíveis para encontros de cerca 2-3pc. Os autores selecionaram 472 estrelas, para o qual tinham os valores de velocidade radial. Destas, 156 estavam organizadas em sistemas de múltiplas estrela, ou eram sistemas binários. Para simplificar os cálculos, os autores desconsideraram diversos efeitos de interação gravitacional, que teriam pouco impacto, para o tempo de simulação escolhido, como pro exemplo, o efeito de oscilação sobre o plano galático. Como resultado, o artigo apresenta que para todo tempo de simulação, os encontros com menos de 5pc de distância ocorrem em um período de $\pm 8,5$ Manos. Na figura 2, observamos o resultado das simulações realizadas, tanto para o passado, como para o futuro. Um total de 113 estrelas passam com uma distância de até 5pc do Sol. A perturbação na nuvem de Oort, não depende apenas da distância da passagem, mas também depende da massa e de quanto tempo dura estes encontros. Os efeitos podem ser calculados a partir da formula 1. Dos encontros no passado, que apresentaram um maior efeito sobre a nuvem de Oort, são advindos da perturbação da Algol (HIP 14576), um sistema triplo de estrelas que passaram há 7,3Manos à uma distância de 3pc. Outra passagem no passado, que pode ter afetado a nuvem de Oort significativamente, foi da estrela AQ Pup (HIP 38965) que passou á uma distância de 1,7pc. No futuro, a estrela que apresenta maior potencial de perturbação é a GL 710 (HIP 89825).[9]

No trabalho de Mülläri e Orlov, foi realizado uma simulação utilizando o catalogo Glise. Selecionaram as estrelas que tiveram ou terão um encontro de até 2pc de distância ao Sol, totalizando em 25 estrelas. O resultado das estrelas apuradas, está representado na tabela 1. Na tabela, temos as duas primeiras colunas, para o identificador numérico, e o nome da estrela, respectivamente. Em seguida, temos o raio em que ocorre a distância mínima entre o Sol e a as estrelas, e o tempo para este encontro. As colunas de Effect (efeito), of Erros (erros), Tidal (maré) e Field (campo), tem relação com os efeitos gravitacionais considerados para o calculo da simulação. Outro aspecto importante citado no artigo, é a estimativa do raio de ação da esfera

Tabela 1: Tabela retirada de [11] das 25 estrelas selecionadas do resultado da simulação. Destas 3 delas já tiveram encontro com o sistema solar no passado, as outras 22 ainda terão. As estrelas marcadas com asterisco, são referentes a estrelas comparadas com o trabalho de [12].

N	Name	Lin.	Fit	Effect	of Erros	Tidal	Field
		$r_{min}(10^3 \text{AU})$	$t_{min}(10^3 \text{AU})$	$r_{min} \pm \sigma_r(10^3 \text{AU})$	$t_{min} \pm \sigma_t(10^3 \text{yr})$	$r_{min}(10^3 \text{AU})$	$t_{min}(10^3 \text{yr})$
82	GJ 2005	154	33.0	156 ± 24	33.2 ± 2.3	154	33.0
305	NN	317	1780	1540 ± 1830	1630 ± 2840	384	1720
456	NN	75	1630	1540 ± 1830	1600 ± 560	32	1600
528	Gl 120.1	280	-431	436 ± 216	-435 ± 47	282	-430
943*	Gl 208	341	-530	523 ± 261	-523 ± 83	337	-529
1160	Gl 271	375	985	840 ± 436	963 ± 214	386	990
1718*	Gl 411	291	19.9	291 ± 13	19.9 ± 0.7	291	19.9
1844*	Gl 445	197	43.7	199 ± 28	43.7 ± 1.7	197	43.7
1848	Gl 447	385	70.3	387 ± 43	69.8 ± 6.6	385	70.4
1927*	Gl 459.2	298	418	1290 ± 18000	1200 ± 13200	303	417
1971	Gl 473	59.6	7.5	59.6 ± 4.7	7.5 ± 0.1	59.9	7.5
1973	Gl 474	53.5	427	363 ± 211	452 ± 126	54.4	427
2077	NN	342	1060	2220 ± 9840	2560 ± 11000	373	1050
2290*	Gl 551	218	25.9	217 ± 16	25.6 ± 4.7	218	25.9
2317*	Gl 559	186	27.2	186 ± 17	27.2 ± 3.2	186	27.2
2778	Gl 682	390	64.3	392 ± 42	64.3 ± 3.7	390	64.3
2848*	Gl 699	238	9.8	238 ± 6	9.8 ± 0.3	238	9.8
2853	Gl 700.1	362	427	478 ± 239	435 ± 82	367	429
2891*	Gl 710	259	1030	853 ± 445	999 ± 275	279	1050
2959	Gl 729	393	134	392 ± 83	130 ± 34	393	134
3167*	Gl 783	372	38.2	374 ± 31	38.3 ± 2.3	372	38.2
3536	Gl 860	388	89.0	392 ± 54	88.6 ± 7.9	390	88.7
3706	NN	91	-515	421 ± 230	-523 ± 109	112	-517
3735	GJ 2157	286	427	436 ± 228	432 ± 68	260	425
3742*	Gl 905	195	36.3	196 ± 23	36.4 ± 1.4	195	36.3

estelar em relação ao Sol, no momento de máxima aproximação,

$$R_a = \frac{r_{min}}{1 + \sqrt{\frac{M_{\odot}}{M}}} \quad (4)$$

sendo M a massa da estrela que tenha passagem próxima ao Sol. De acordo com os resultados apresentados, a estrela Gl 474 (1973)¹ terá o maior efeito na nuvem de Oort, comparada com as outras 25 estrelas. [11]

Dybczynski e kankiewicz, realizaram cálculos utilizando diferentes métodos de integração, desde os mais simples, em que desconsidera-se a força gravitacional, assumindo que o movimento é retilíneo, até cálculos mais complexos, como o modelo de potencial galático (Galactic potential model). No estudo, utilizaram o catalogo Glise, Hipparcos e Barbier-Brossat, para cruzamento de dados. Da comparação entre os resultados de cada método, concluíram que a maior parte das trajetórias das estrelas próximas ao Sol, podem ser bem aproximadas, à um movimento retilíneo, e que a interação gravitacional só é necessária para encontros muito próximos ao Sol, de estrelas massivas e que passam a baixas velocidades. Os resultados para métodos mais complexos, mostraram-se similares ao “movimento retilíneo”. Os autores, ainda comentam sobre os efeitos

¹Importante notar que, os diverso autores citados, concluem que, diferentes estrelas terão maior efeito sobre a nuvem de Oort. Isso se dá, aos diferentes métodos de cálculos utilizados, aproximações distintas, assim como catálogos diferentes.

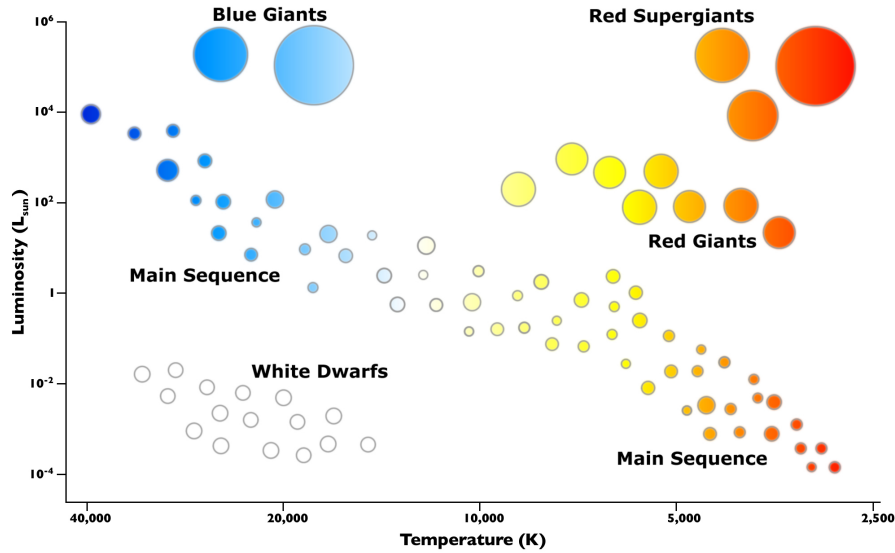


Figura 3: Imagem retirada de [17], que mostra o diagrama HR para diferentes tipos de estrelas. As estrelas de sequência principal, no qual a estrela passa a maior parte da sua existência, as gigantes, que são estrelas que saíram da sequência principal, e estão começando a “morrer”, e pra cada tipo massa, estrelas terão diferentes fins. Na parte inferior esquerda, temos as anãs brancas, estrelas de alta temperatura e baixa luminosidade, que são estágio finais de estrelas como o Sol, por exemplo.

dos valores não bem determinados da velocidade radial das estrelas, dos catálogos Gliese e Hipparcos e que causam erros significativos nas simulações e discrepância nos resultados [13].

Conforme apresentado no artigo [10], o trabalho faz uma simulação de 100 mil anos, utilizando o catalogo Gliese e o método de “movimento retilíneo” que desconsidera gravitação entre as estrelas. O resultado apresentado, foi que Lalande 21185, torna-se a estrela que passou mais próxima ao Sol, com uma distância de 1,04pc, passando as Alpha Centauris, que atualmente são as estrelas mais próximas ao Sol, à uma distância de aproximadamente 1,29pc [10].

No trabalho de Salaris e Cassis, apresenta o resultado para GL 710, já citada por trabalhos anteriores. Como resultado da simulação do trabalho, aproximadamente $1,8 \times 10^6$ cometas serão perturbados, a ponto de chegarem a cruzar a orbita da Terra, chegando ao longo de um período de 2-10M anos. O autor ainda comenta sobre as missões dos novos catalogos, como GAIA, com esperança de que traga dados mais precisos de velocidade radial, de forma que possamos ter melhores dados, para estudar o impacto de passagens próximas e como elas poderão afetar a Terra [14].

2.3 Massa-Luminosidade

Em alguns catálogos de estrelas, como é o caso do Gliese e Hipparcos, não possuímos informações sobre a massa da estrela, entretendo, temos informações como luminosidade aparente, que nos permite estimar as massas destas estrelas. [15] [16]

Para a astronomia, existe um diagrama muito importante, chamado de diagrama Hertzsprung-Russell (HR), o qual mostra a relação entre a luminosidade da estrela, em relação a temperatura, ou classe espectral. A maioria das estrelas encontra-se na fase de sequência principal (Main Sequence), como ilustra a 3. Na maior parte de sua existência, a estrela fica nesta região. O tempo que cada estrela passa nesta fase, depende muito da sua massa, estrelas de baixa massa, como anãs vermelhas, demoram muito tempo para sair desta sequência, já que, a taxa com que elas fazem a fusão, é muito baixa, de forma que duram bilhões de anos. Estrelas com massa maior, como as gigantes azuis, possuem muita massa, são muito quentes, e sua taxa de

fusão é muito rápida, portanto, duram apenas alguns milhões de anos. Quando estrelas saem da sequência principal, elas passam para a fase de gigantes, e dependendo da sua massa, elas apresentam diferentes desfechos. Para estrelas que passam ao estagio de gigantes e super gigantes vermelhas, seu final, se dá nas anãs brancas, que aparece na parte inferior esquerda do diagrama.[2].

Como os modelos de evolução estrelas predizem que a estrela passa maior parte da sua vida, na fase de sequência principal. Para estas, existe uma propriedade de grande relevância, a relação da sua massa total (M) e a luminosidade superficial (L), comumente chamada de relação massa-luminosidade. Modelando uma estrela de sequência principal, como se fosse feita de um gás ideal e estando em equilíbrio hidrodinâmico, obtemos uma relação de proporcionalidade,

$$L \propto M^3, \quad (5)$$

este resultado, é verdadeiro, para estrelas “ideais”. Todavia, o coeficiente que eleva a massa, varia, dependendo da massa da estrela.[15] [19].

Na tabela 2.3, vemos os coeficientes para estrelas que variam de 0.2 até $20M_{\odot}$

Tabela 2: valores referentes ao coeficiente, para diferentes faixas de massa de uma estrela em sequência principal.

Massa (M_{\odot})	coeficiente de massa
0.5-0.2	2,6
2-0,5	4,5
2-20	3,6

De forma mais geral, a relação de massa e luminosidade de um estrela é dado por,

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^a \quad (6)$$

sendo M_{\odot} e L_{\odot} massa e luminosidade do Sol, a é o “coeficiente de massas”, que varia conforme a tabela 2.3. De maneira geral, utilizamos $a = 3$ já que a maioria das estrelas se encontra na fase de sequência principal.[18]

3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo estatístico que visa avaliar as perturbações na trajetória e ejeção de asteroides da nuvem de Oort, processo este, decorrente da ação gravitacional da passagem de estrelas próximo ao nosso sistema solar, com o intuito de determinar a fração de cometas perdidos, ganhos e com orbitas desviadas.

4 Metodologia de pesquisa

Para realizar este trabalho, pretende-se construir um programa computacional próprio e utilizar dados de catálogos de estrelas de domínio publico, como Glise, Hipparcos e GAIA, o qual escolheremos levando em consideração acuracidade e facilidade em manipular os dados dentro e fora da simulação.

Primeiramente, será estudado os catálogos de domínio publico e escolher dentre eles, qual o melhor que se encaixa para com o objetivo do trabalho. Levando em consideração também a facilidade de manipulação e obtenção de dados. A partir disto, será construído um programa em linguagem C, que possibilite importar e manipular dados do catálogo de estrelas e fazer as devidas transformações para realizar a simulação.

Em seguida, o programa passará por modificações que possibilite o cálculo do movimento relativo de cada estrela, em relação ao Sol, sem considerar a atração gravitacional. Após realizada esta etapa, será verificada a eficiência da simulação e se os resultados condizem com os obtidos em literatura. Então será adicionado a interação gravitacional e para isso, precisaremos estimar as massa das estrelas. Após isto, poderemos novamente validar os resultados obtidos.

Em seguida, adicionaremos uma nuvem de Oort ao sistema solar e as possíveis estrelas que serão selecionadas para a simulação. Por fim, realizaremos as análises obtidas dos resultados desta ultima simulação, sendo este, o objetivo final deste trabalho.

4.1 Metodologia empregada

Com o objetivo de escrever uma código computacional, que simule o comportamento do movimento de estrelas próximas ao Sol. É necessário considerar diversos fatores que contribuem e interferem no movimento. Entretanto, considerar todos os efeitos físicos, aumentaria a complexidade da análise e recurso computacionais. Optamos por elaborar uma simplificação física. Assim, podemos fazer uma aproximação da realidade, desprezando efeitos, que podem ser desconsiderados inicialmente.

A metodologia empregada para realizar os cálculos da simulação computacional, consiste em coletar certos dados do catalogo Gliese e cruzar com as informações do catalogo Hiparcos, e processá-los (ver tabela 3 com alguns exemplos). Para assim, gerar uma evolução computacional, de um possível cenário da dinâmica estelar.

O catalogo Gliese possui cerca de 4mil estrelas, entretanto muitas delas tem informações faltantes que são necessárias para realizar a simulação. Foram então, selecionadas cerca de 1,8 mil estrelas. Que após as primeiras simulações, foram feitas triagens para reduzir para as mais próximas. Do qual selecionamos as mais próximas, em um raio de 12 ano-luz.

Inicialmente, importamos os dados da ascensão e declinação, referente ao sistema de coordenadas equatoriais. Estas informações, nos mostram em que posição no céu estas estrelas estão posicionadas em relação ao referencial terrestre.

Com a paralaxe trigonométrica, calculamos a distância(R) que estas estrelas estão em relação a Sol.

$$R = \frac{1}{plx}, \quad (7)$$

no qual plx é o valor em mili-arco-segundo (mas) para cada estrela.

O Catalogo Gliese, fornece a velocidade de algumas estrelas já transformadas para forma de coordenadas galáticas (ver tabela 3 e [16]), que podemos escrever na forma vetorial, como:

$$\mathbf{v} = V\hat{i} + U\hat{j} + W\hat{k} \quad (8)$$

Com a posição em coordenadas equatoriais, convertemos para coordenadas galáticas, da seguinte forma: Para longitudinal l e para latitudinal, b ;

$$l = 303^\circ - x,$$

$$\tan(x) = \frac{\sin(\alpha_0 - \alpha)}{\cos(\alpha_0 - \alpha)\sin(\delta_0) - \tan(\delta)\cos(\delta_0)},$$

$$\sin(b) = \sin(\delta)\sin(\delta_0) + \cos(\delta)\cos(\delta_0)\cos(\alpha_0 - \alpha),$$

sendo os valores de referência, $\alpha_0 = 192,25^\circ$ e $\delta_0 = 27,4^\circ$, para B1950.

Então efetuamos uma nova transformação, agora de coordenadas galáticas para Cartesianas, podemos escrever o vetor que representa o movimento da estrela em três dimensões, como:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}(t), \quad (9)$$

no qual, \mathbf{r} é a posição em função da posição inicial (\mathbf{r}_0) e velocidade ($\mathbf{v}(t)$). Assim, as condições iniciais necessárias para realizar a integração numérica.

Para realizar o cálculo das novas posições de cada corpo no espaço foi utilizado o integrador de Verlet, um método de segunda ordem, com níveis de eficiência em velocidade e taxa de erros intermediários. Este integrador é mais preciso que o Método de Euler (1º ordem), contudo tem mais custo computacional. Se comparado com o Método de Runge-Kutta, de quarta ordem, que tem melhores resultados, mas é extremamente custoso. Como vamos estar utilizando para calcular a atração gravitacional de corpos muito distantes, o método de segunda ordem é o que apresenta uma melhor eficiência.

O algoritmo de Verlet integrado no tempo, que escreve-se na seguinte forma;

$$\begin{aligned} \vec{r} &= 2\vec{r}(t) - \vec{r}(t - \Delta t) + \vec{a}(t)(\Delta t)^2, \\ \vec{v}_m &= \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t - \Delta t)}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (10)$$

o qual \vec{r} é a posição da partícula (corpo), t é o instante do tempo, sendo Δt o passo de tempo (passo de integração), e $\vec{a}(t)$ a aceleração no tempo t .

Utilizamos o método de Verlet, para integrar a equação (9). De forma que a posição da estrela, será sua posição anterior (ou inicial, para tempo $t = 0$), adicionado o que a estrela percorreu em um passo de tempo de integração, dt (sua velocidade variável, \mathbf{v} , multiplicado pelo tempo). Em outras palavras, a nova posição será a posição anterior, mais uma distância percorrida. Sendo que isto é realizado para cada componente cartesiana, para todas as estrelas. Para calcular a aceleração do corpo, utilizamos,

$$\vec{a}_i = G \sum_j \frac{m_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2}, \quad (11)$$

sendo G a constante universal da gravitação, m_j é a massa do corpo e $\mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ é a distância entre os dois corpos.

Para realizar a análise da mudança de posição, devemos calcular a distância de cada estrela em relação ao centro, da seguinte forma,

$$R_{sol} = \sqrt{\Delta(x)^2 + \Delta(y)^2 + \Delta(z)^2} \quad (12)$$

Assim, feita a simulação, poderemos analisar a distância de cada estrela ao longo do tempo de simulação.

Por fim, como estamos lidando com um número de estrelas, em determinado volume do espaço, podemos calcular a densidade estelar ao redor do Sol. Para isso, fazemos a quantidade de estrelas em certo volume, dividido sobre o este volume.

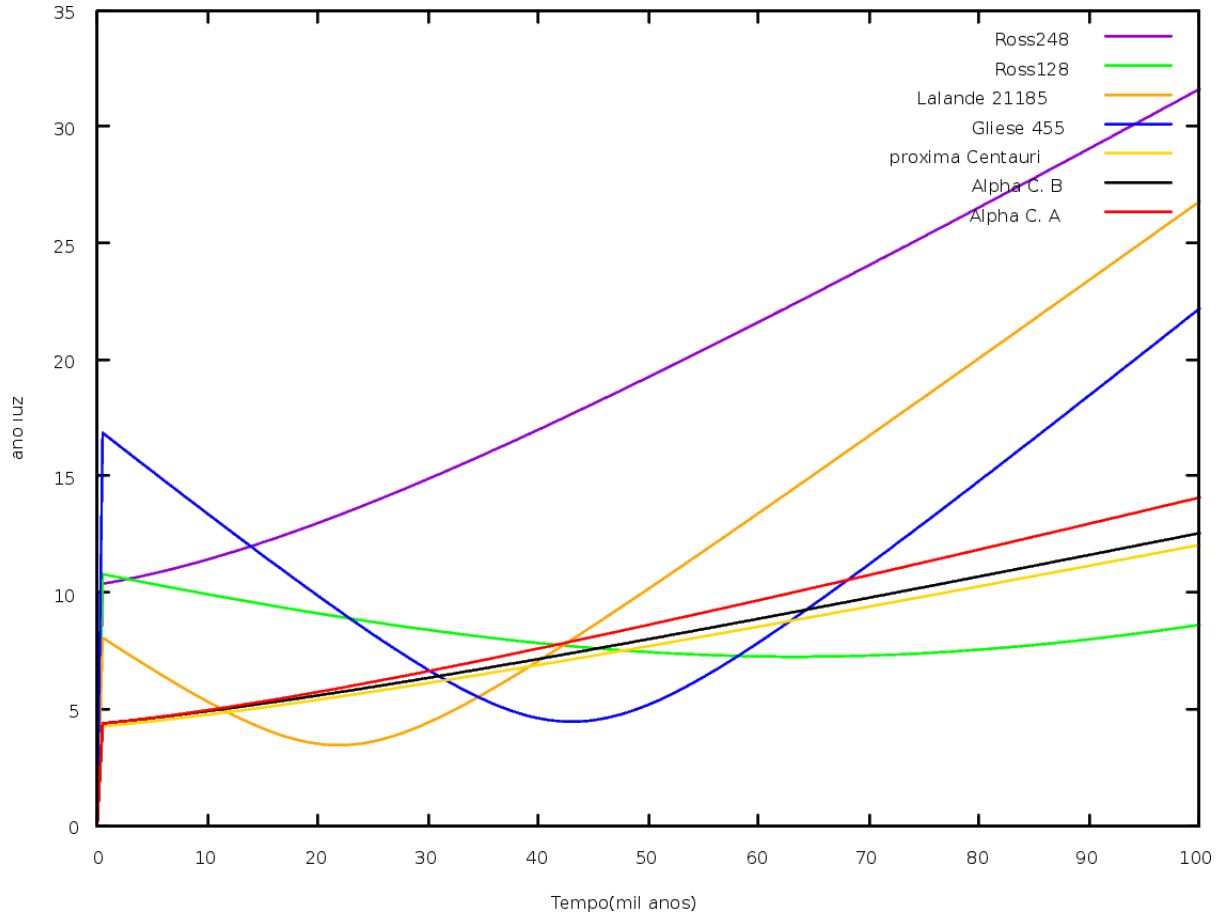


Figura 4: Pelo gráfico podemos ver o que acontece na simulação. O tempo 0, corresponde a época presente e o Sol está localizado em no ponto 0 do eixo horizontal. Inicialmente as estrelas *Próxima centauri*, é a estrelas mais próximas do Sol. Vemos que elas se afastam a medida que os anos passam e, outras estrelas mais distantes, como Gliese 455, Ross 128 e Lalande 21185 se aproximam do Sol. Sendo que a inclinação das curvas, representam a velocidade das estrelas. Logo as com maior curvatura, como a Gliese 455, são estrelas mais rápidas, se compradas à Ross128, por exemplo.

5 Análise e Resultados

Como resultado da simulação computacional para um tempo de 100 mil anos e centenas de estrelas, foi gerado um vídeo¹, para melhor visualização da dinâmica estelar ao redor do Sol. Para isso foram selecionadas as estrelas que estavam a uma distância radial de 12,1 anos-luz. Não foi distinguido, massa e nem tamanho, portanto, todas estrelas são consideradas puntuais, todas tem o mesmo aspecto visuais. Sendo apenas o Sol,

¹acesso: <https://github.com/ArielKollross/kastar/blob/master/simulation.mp4>

Tabela 3: Dados selecionado a partir da primeira simulação, em que determinamos dentro da amostragem total, as estrelas que passariam mias próximas ao Sol. Para a simulação numérica precisamos da declinação (DE) e acenação (RA), para saber a localização no plano celeste, a paralaxe para descobrir a distância e velocidade em coordenadas galáticas (V, U e W), para calcular o movimento ao longo do tempo. Pro fim as massas de cada estrela, que esta definida à partir da unidade de massa solar.

Nome	RA(hms)	DE(dm)	paralaxe(mas)	V	U	W	Massa(M _☉)
					(km/s)		
proxima centauri C	14 26 19	-62 28.1	771,8	−25	−2	13	0,12
α cent A	14 39 36.5	-60 50.04	747,78	−32	4	14	1,11
α cent B	14 39 35.1	-60 50.25	746,56	−26	−1	14	0,94
Ross 248	23 41 55	+44 10.63	316,96	33	−74	0	0,14
Lalande 21185	11 03 20.2	+35 58.19	392,64	46	−53	−74	0,46
Ross 128	11 47 44.4	+00 48.27	301,1	18	6	−33	0,17
Gl 455	17 57 48.5	+04 41.6	547,45	−141	5	18	0,32

Tabela 4: Tabela comparacional entre as densidades de estrelas. Calculadas a partir dos valor obtidos pela simulação, e dos valores observacionais. Vemos que os valores estão relativamente próximos para 5,0 e 12,0 anos-luz. No entanto, para 20,0 anos-luz, temos um erro de 24%.

Distância (ano-luz)	ρ_{sim}	ρ_{eft}
5,0	0,0057	0,0057
12,0	0,0037	0,0041
20,0	0,0025	0,0033

ao centro, diferenciado das demais.

O Sol aparece estático ao longo da simulação, pois estamos considerando o Sol como um referencial inercial e calculando a aproximação ou afastamento das estrelas ao longo do tempo.

No vídeo, podemos ver que existem estrelas muito lentas, que pouco se movem durante o tempo, e estrelas muito rápidas, que desaparecem rapidamente, ficando fora de escala na simulação.

Podemos visualizar inicialmente, que existem muito mais estrelas no plano superior em relação ao sol. Entretanto, ao decorrer do tempo, a distribuição de estrela fica mais espaçadas, ou seja, mais distante umas das outras, e mais homogeneamente distribuída.

Portanto, a partir da visualização do vídeo, podemos ter noção de como ocorre a dinâmica estelar, ao longo do Sol em 100 mil anos. Sendo este tempo comprimido em alguns segundos de simulação.

Com a distância das estrelas em relação ao Sol, calculada pela equação (12), plotamos em relação ao tempo de simulação. Obtendo o gráfico da figura 4.

Analisando o gráfico. Temos o Sol na origem do sistema, e lá permanecendo ao longo da simulação (referencial inercial).

No tempo inicial, temos as estrelas de Próxima Centauri (4,2 anos-luz), α -Centauri A e B (4,4 anos-luz), como as estrelas mais próximas do Sol, seguidas por Lalande 21185, Ross 248, Ross 128 e por ultimo Gliese 455. Cada estrela é representada por uma curva. A posição da estrela muda, afastando-se ou aproximando-se do Sol. Como o gráfico é o modulo da distância estrela-Sol, ao longo do tempo, se tomarmos a derivada em cada ponto, temos a inclinação da reta tangente. A derivada em cada ponto, representa a velocidade em relação ao Sol. Portanto as curvar com curvatura mais suave, são estrelas mais lentas. Como a Ross 128 e as α -Centauri. Já as com curvatura mais acentuadas, como Glise 455 e Lalande 21185 são as mais velozes.

Conforme o tempo de simulação decorre, vemos as três estrelas mais próximas, Próxima Centauri e α -Centauri A e B afastando-se do Sol. Em aproximadamente 12 mil anos, acontece a primeira mudança de estrelas mais próximas. Quando Lalande 21185, passa Próxima Centauri. Decorridos 22 mil anos, Lalande, tem sua máxima aproximação em 3,4 anos luz. Ficando aproximadamente 0,8 ano-luz mais próxima que Próxima Centauri era no inicio da simulação.

Em aproximadamente 36 mil anos, Gliese 455, se torna a estrela mais próxima, enquanto Lalande, se afasta do Sol. Então em 57 mil de simulação, ocorre a terceira e ultima troca, na qual Ross 128 assume, como estrela mais próxima do Sol até o fim da simulação.

Portanto temos que Gliese 455 e Lalande, são as estrelas que terão uma aproximação de menos de 5 anos-luz e tem um passagem relativamente “lenta”, de modo que são duas boas candidatas para causarem perturbações na nuvem de Oort.

Com a quantidade de estrelas em certa região do espaço, calculamos a densidade de estrelas atual, ρ_{sim} , valor simulacional e comparamos com a densidade efetiva atual, ρ_{eft} . Podemos ver estes resultados pela tabela 4.

Para distância de 5 anos-luz, ou seja, para um volume de uma esfera de 5 anos-luz de raio, obtemos, $\rho_{sim} = 0.0057$, sendo que o valor de $\rho_{eft} = 0.057$. Então obtivemos o valor esperado pelo nossos conhecimento de distribuição de estrelas atual. Os valores seguintes, existe certa discrepância. Para a distância de 12,0 anos-luz, temos um valor próximo. Já para a distância de 20.0 anos-luz, o erro é grande, cerca de 24% do valor esperado.

Um motivo plausível para estas diferenças, está na utilização do Catalogo Gliese. Como o catalogo não consegue detectar as estrelas próximas, que não possuem brilho o suficiente para serem detectadas. É o caso de anãs-brancas, anãs marrons e algumas anãs vermelhas de baixa massa. Então pode existir uma defasagem em relação ao numero conhecido de estrelas atual, em relação as estrelas contidas no Catalogo Gliese.

Portanto, conforme aumentamos a distância analisada, devem existir cada vez mais estrelas que não são detectadas por métodos fotométricos, então o valor deve de ρ_{sim} e ρ_{sim} , devem divergir cada vez mais, ao passo que aumentamos o raio analisado. Outro motivo, mas, menos relevante, é que não existem estrelas que tenham paralaxe abaixo de 0,0039 arsec no catalogo.

Devido ao alto custo de processamento e de tempo simulacional, seria necessário desenvolver uma simulação que faça interação gravitacional entre milhares de corpos. De forma que, o tempo de simulação cresce exponencialmente para cada interação. Portanto, não foi possível obter resultados para a simulação das duas estrelas citadas com o Sol, e assim, determinar a perturbação que estas causariam nos cometas da nuvem de Oort.

6 Conclusão

Utilizando de simulações computacionais, juntamente com conceitos de calculo vetorial e métodos numéricos foi possível realizar um estudo sobre o comportamento da dinâmica de estrelas ao redor do Sol.

Por meio da análise do vídeo, verificamos o comportamento cinético da estrelas, e constatamos que no final da simulação as estrelas ficam mais espaçadas e mais homogeneamente distribuídas ao redor do Sol.

Analizamos a partir dos resultados gerados pelo gráfico 4, a mudança de posição das estrelas próximas. Inicialmente tínhamos como mais próxima, a Próxima Ceuntauari. Em 12 mil anos de simulação, Lalande 21185 passa a ser a mais próxima, sendo sua máxima aproximação à 3,4 anos-luz no tempo de 22 mil anos. Passado 36 mil anos, temos como estrela mais próxima Gliese 455. Pro fim, 57 mil anos de simulação Ross 128 será a estrela mais próxima, até o final da simulação. Destas estrelas Glise 455 e Lalande são as que tem maior aproximação, por um tempo relativamente grande para afetar a nuvem de Oort.

Por meio da tabela 2, verificamos a densidade atual das estrelas. Constatamos que, para distâncias relativamente próximas, a densidade de estrelas simuladas está próximo ao valor conhecido hoje. Mas conforme aumentamos a distância analisada, o Catalogo Gliese, não tem informações suficientes para efetuar os cálculos corretamente.

7 Assinaturas

Ass: _____

Ass: _____

Ariel Vinícius Cordeiro Kollross (Orientando)

Referências

- [1] G. A. Chebotarev, et al, The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1972, p. 402-
- [2] N. F. Comins, W. J. Kaufmann III, Discovering The Universe, W. H freeman and Company, 2008.
- [3] J. H. Oort, The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 1950
- [4] A. Morbidelli, Origin and Dynamical Evolution of Comets and their Reservoirs, 2008.
- [5] L. Dones, et al, Oort Cloud Formation and Dynamics, 2003.
- [6] P. R. Weissaman, Star Passages through the Oort Cloud, Earth, Moon and Planets, Volume 72, Issue 1-3, pp. 25-30, 1996.
- [7] P. R. Weissaman, Stellar pertubation of the cometary Claud, Nature, 1980.
- [8] J. G. Hills, Comet showers and the steady-state infall of comets from the Oort cloud, Astronomical Journal, vol. 86, Nov. 1981, p. 1730-1740, 1981.
- [9] J. G. Sanchez, et al, A search for stars passing close to the sun, 1997.
- [10] A. V. Kollross, Estrelas próximas ao Sol, sobre uma perspectiva computacional, 2017.
- [11] A. A Mülläri, V.V. Orlov, Encontros of the sun with nearby stars in the pass and future, 1996.
- [12] I. Revina, Nearby stars in the future and in the past to estimate perturbation in cometary motion, 1988.
- [13] P. A. Dybczynski, P. Kankiewicz, 1999.
- [14] J. G. Sánchez, Close Approaches of Stars to the Solar System Based on Hipparcos Data,
- [15] M. Salaris, S. Cassisi, Evolution of Stars and Stellar Populations, Wiley, 2005, pg 138-140.
- [16] GLIESE W., JAHREISS H.Preliminary, Version of the Third Catalogue of Nearby Stars, Rechen-Institut, Heidelberg 1991.
- [17] Socratic, Disponível em <<https://socratic.org/questions/what-is-the-hertzsprung-russell-diagram-and-why-is-it-so-important-to-astronomy->>, acessado em 24nov. 2018.
- [18] Hyperphysics, Disponível em <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/herrus.html#c3>>, acessado em 24nov. 2018.
- [19] N. Duric, Advanced Astrophysics, Cambridge, 2004.