



INSTITUTO DE FÍSICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Pós-Graduação

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Tópicos de Física Contemporânea

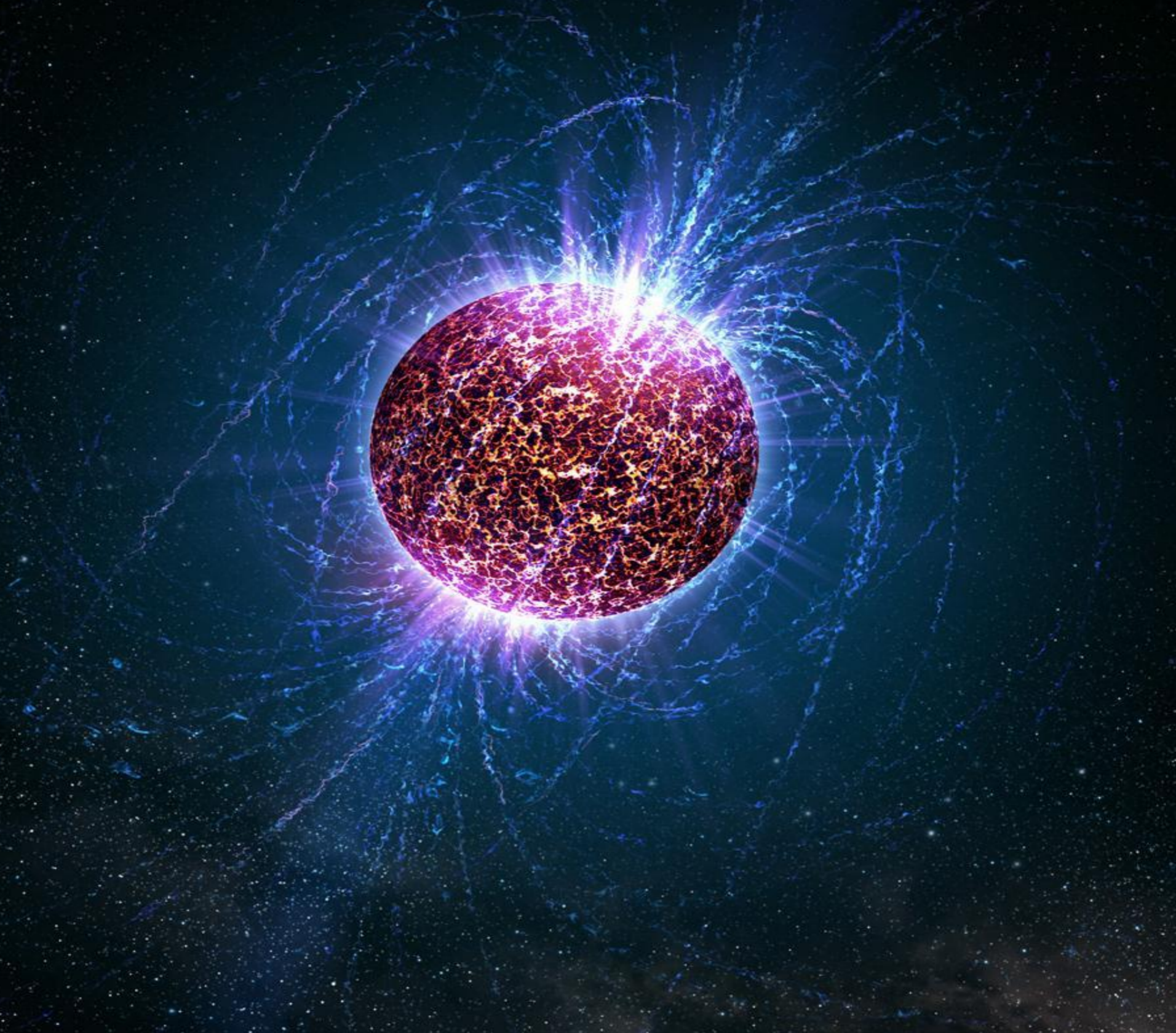
SANDRO FERNANDES

TENHO DÓ DAS ESTRELAS (FERNANDO PESSOA)



Tenho dó das estrelas
Luzindo há tanto tempo,
Há tanto tempo...
Tenho dó delas.
Não haverá um cansaço
Das coisas,
De todas as coisas
Como das pernas ou de um braço?
Um cansaço de existir,
De ser,
Só de ser,
O ser triste brilhar ou sorrir...
Não haverá, enfim,
Para as coisas que são,
Não a morte, mas sim
Uma outra espécie de fim,
Ou uma grande razão –
Qualquer coisa assim
Como um perdão?

Estrelas de Nêutrons



CAPÍTULOS

(I) A PROTO-ESTRELA

(II) OBJETOS COMPACTOS

(III) MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA

(IV) ESTRELAS DE NÊUTRONS (HISTÓRICO)

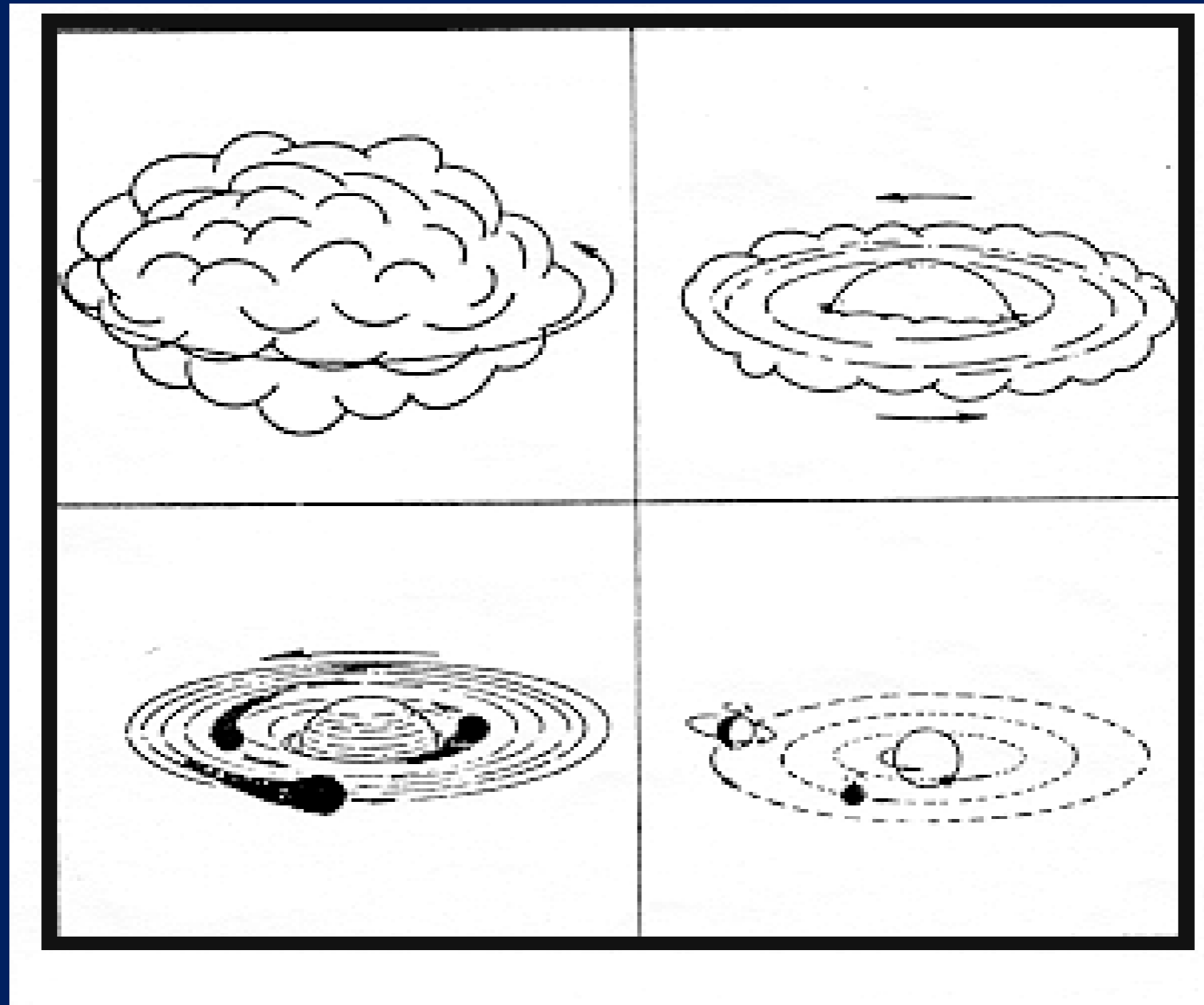
(V) ESTRELAS DE NÊUTRONS

(VI) PULSARES

(VII) EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO

(VIII) BIBLIOGRAFIA

(I) DA PROTO-ESTRELA AO SISTEMA PLANETÁRIO



Imagine uma imensa nuvem escura somente iluminada pela tênue luz estelar, e que flutue no espaço vazio. É muito pouco densa, porém não é uniforme. Há lugares onde a densidade é levemente maior que a média. Pouco a pouco, em parte por azar e em parte por uma pequena ação gravitacional, a nuvem de gás começa a condensar-se ao redor desse ponto de maior densidade. O processo é lento, pode-se passar vários milhares de anos sem se veja nada fora do comum em uma nebulosa como a que se imagina agora. São necessários milhões de anos... e uma grande paciência.

A temperatura no interior da nuvem é baixa: da ordem de 10 kelvin; e o gás não possui energia interna suficiente para impedir que a nuvem caia em si mesma, ou seja, que se contraia devido a ação gravitacional.

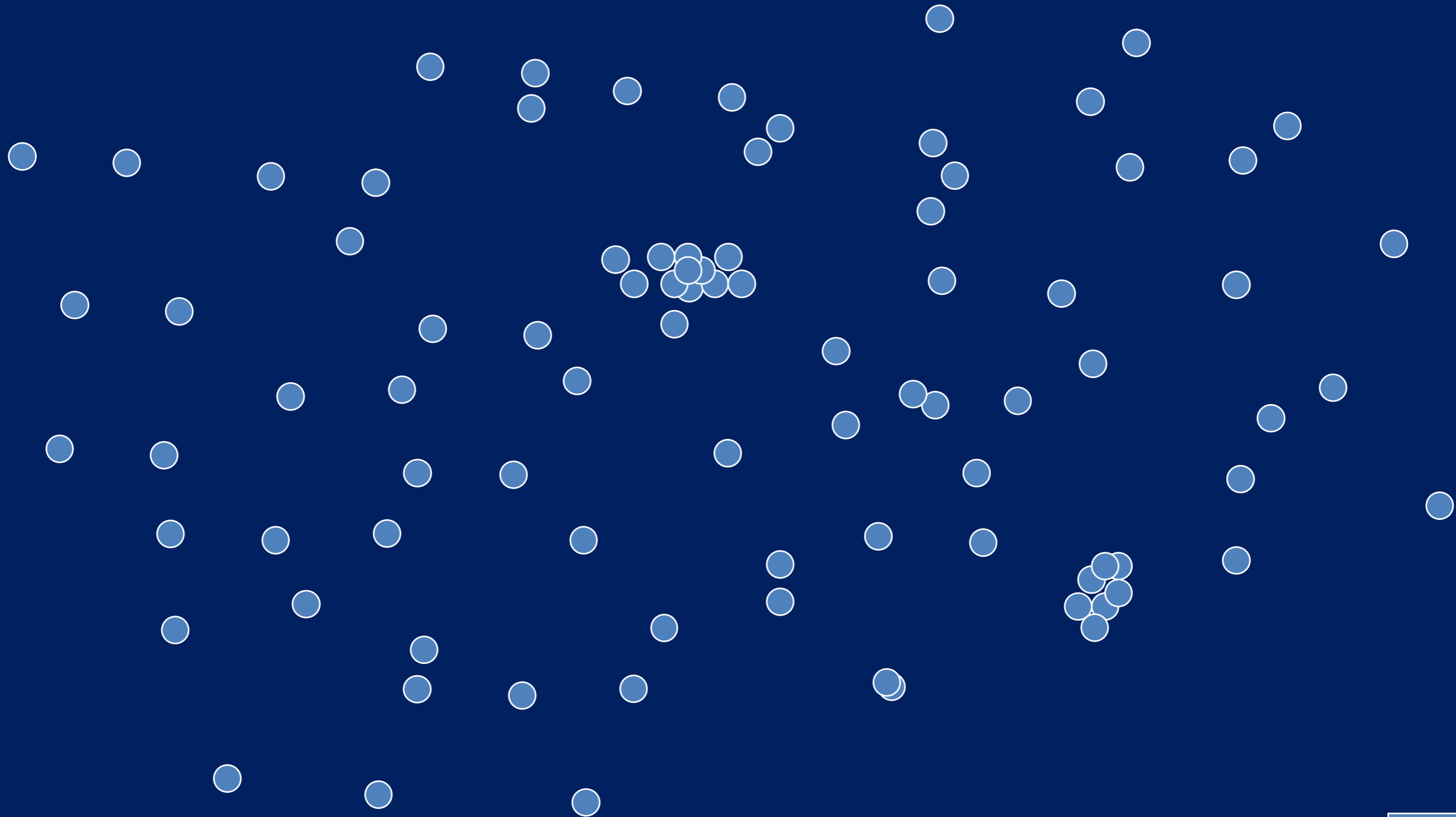
Neste estágio a nuvem de gás está mais quente, pois o gás assim comprimido tende a esquentar-se (2000 a 3000 kelvin).

Mil anos mais tarde, no interior da nuvem encontramos uma bola incandescente 20 vezes maior que o sol e 100 vezes mais brilhante que este. O calor em seu interior é suficiente para produzir reações termonucleares com o hidrogênio do núcleo.

Acaba de nascer uma estrela.

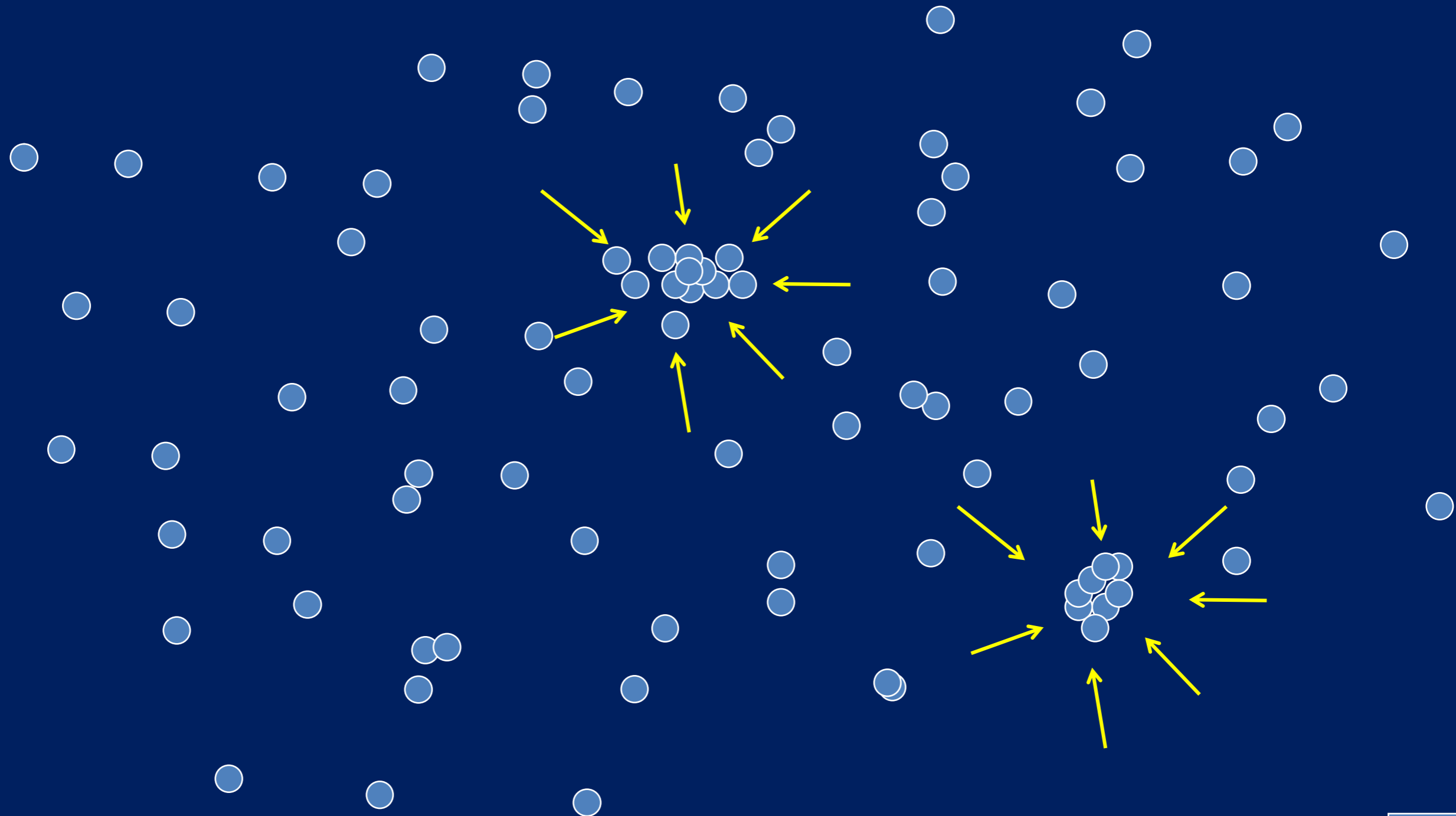
Instabilidade gravitacional

Diagrama de bolinhas



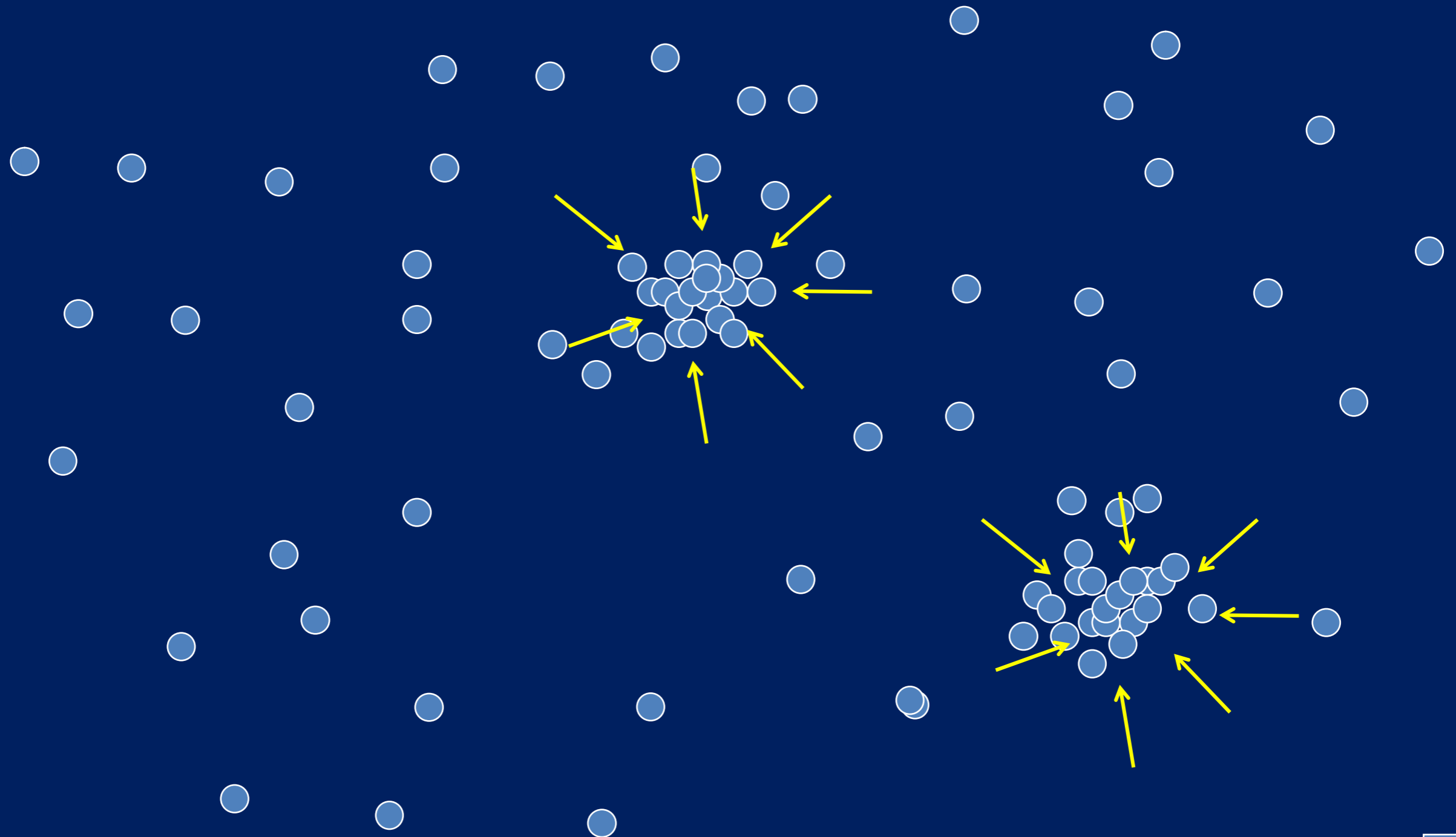
Instabilidade gravitacional

Diagrama de bolinhas



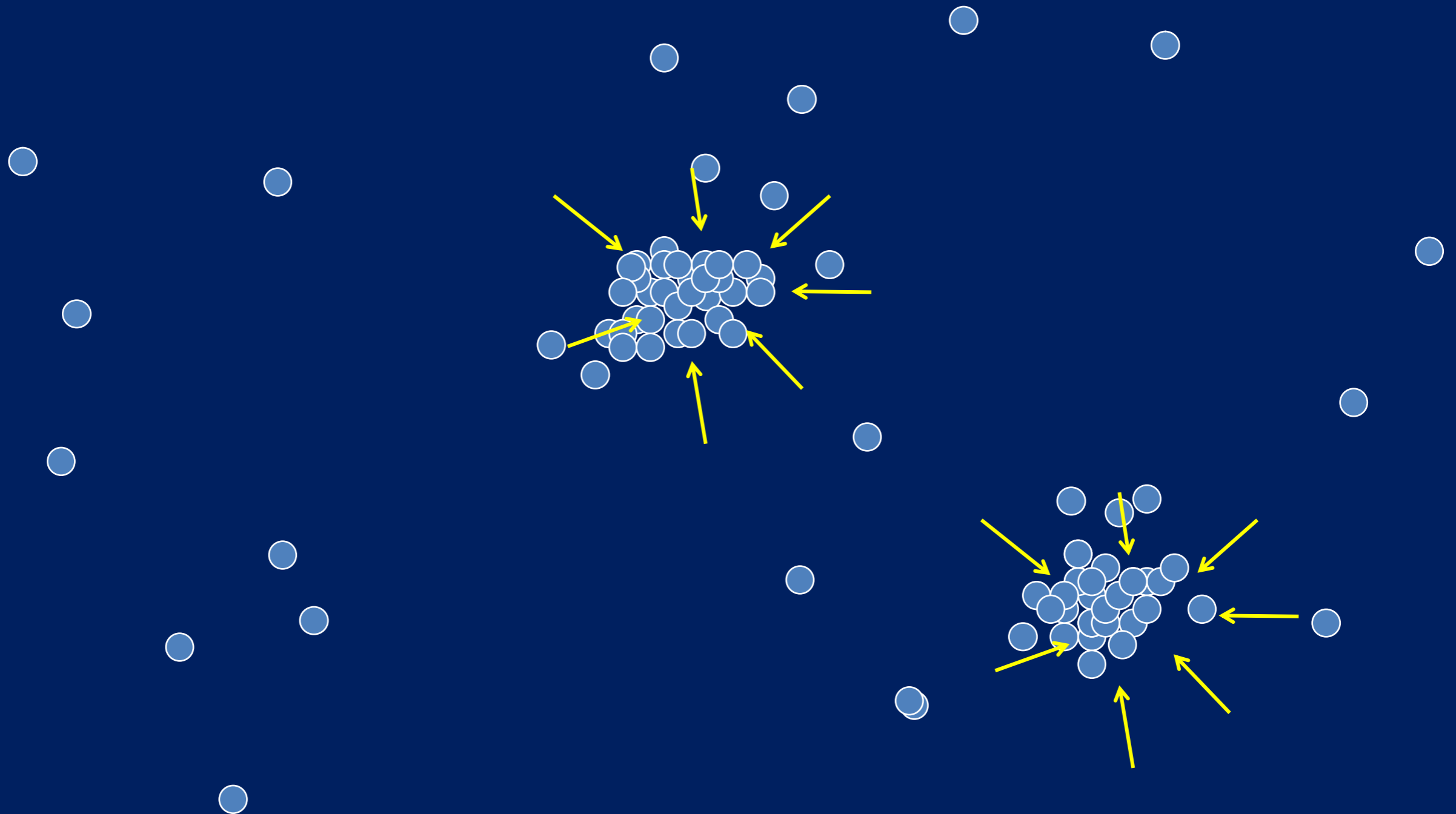
Instabilidade gravitacional

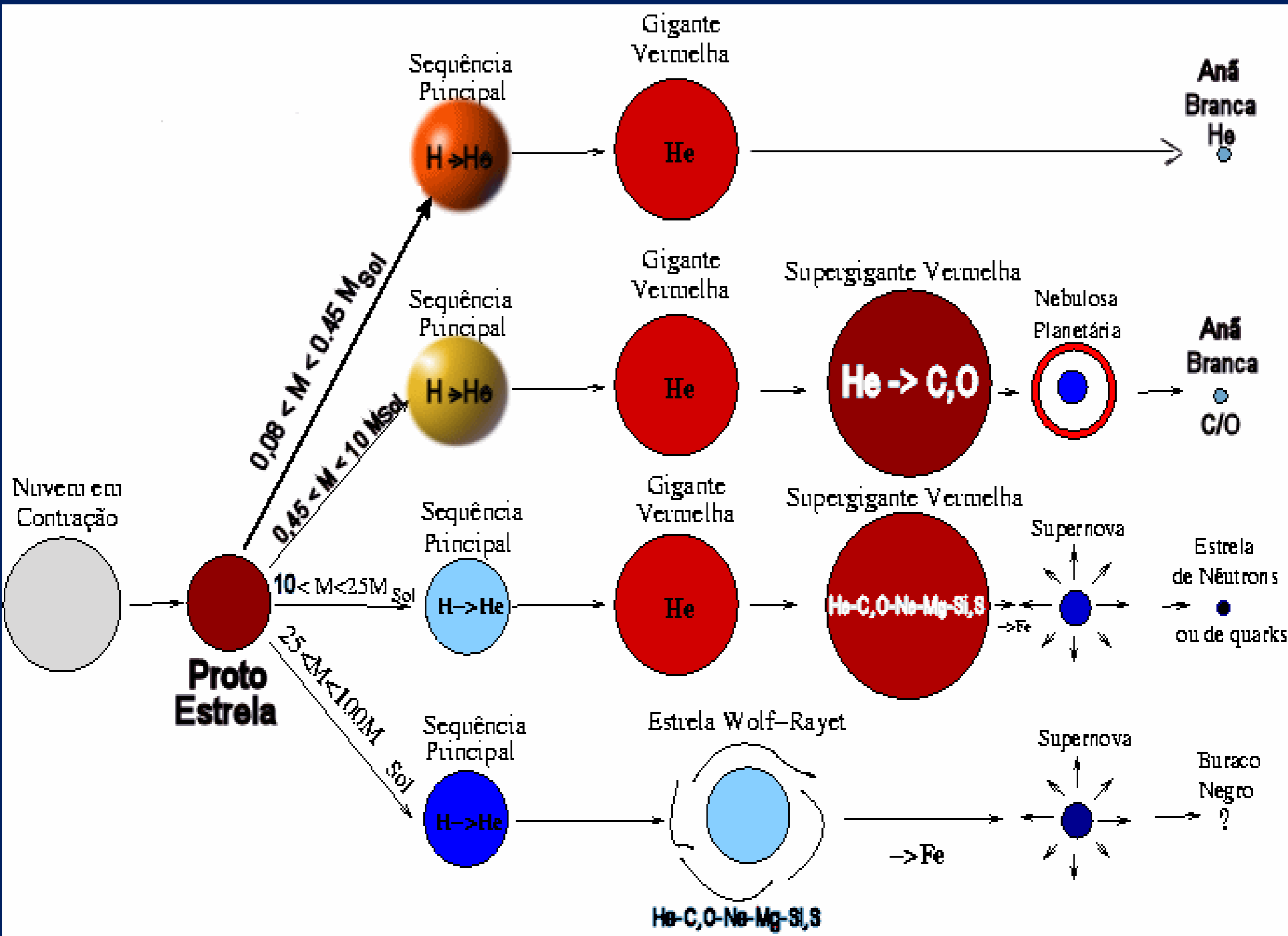
Diagrama de bolinhas



Instabilidade gravitacional

Diagrama de bolinhas





(II) OBJETOS COMPACTOS

Há estrelas que são conhecidas pelo nome de *objetos compactos*. Uma anã branca, por exemplo, tem o seu raio da ordem do raio da Terra, mas uma massa de ~ 1,4 MASSA SOLAR . Ou seja: uma anã branca típica é um objeto estelar com uma massa cerca de 40% maior do que a massa solar *compactada em um volume 1 milhão de vezes menor do que o Sol!!* Como isso é possível??

Pense, agora, em uma estrela de nêutrons, que tem uma massa (típica) da ordem de 1,4 MASSA SOLAR e um raio de apenas 15 km!! Como é possível que um objeto estelar assim exista?? Anãs brancas e estrelas de nêutrons, assim, caracterizam-se por ter uma densidade média elevada e são chamados de *objetos compactos, assim como os buracos negros*

(III) MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA

Uma única colher de matéria da Superfície de uma Estrela de Nêutrons equivale a massa de 100 milhões de elefantes...

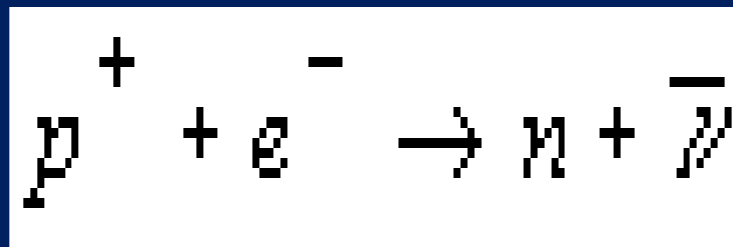


(IV) Estrelas de Nêutrons (Histórico)

A idéia de que estrelas de nêutrons existiam é relativamente antiga. Em um artigo em 1934, Walter Baade e Fritz Zwicky (Baade e Zwicky, 1934), propuseram a existência das estrelas de nêutrons, objetos de maior densidade do que as anãs brancas. Eles achavam que estrelas de nêutrons nasciam em explosões de supernovas. Em 1939 Robert Oppenheimer e George Michael Volkoff publicaram um artigo com os primeiros cálculos estruturais sobre uma estrela de nêutrons (Oppenheimer e Volkoff, 1939). Outros trabalhos seguiram-se sobre o tema, mas as estrelas de nêutrons foram “deixadas de lado” pelo simples fato de que , com a tecnologia disponível na época, elas não podiam ser observadas.

(V) As Estrelas de Nêutrons

Se a densidade de uma estrela aumentar ao ponto em que os elétrons cheguem muito perto dos prótons, estas partículas reagiriam segundo a equação:



ou seja, um próton absorve um elétron, transformando-se em nêutron e emitindo um anti-neutrino (que escapa quase livremente drenando energia para fora da estrela).

Numa massa de matéria tão compacta, as interações entre os nêutrons são consideráveis.

A uma dada densidade, os nêutrons formam um estado degenerado, podendo gerar a pressão suficiente para conter o colapso. Esta nova configuração estável é chama Estrela de Nêutrons.

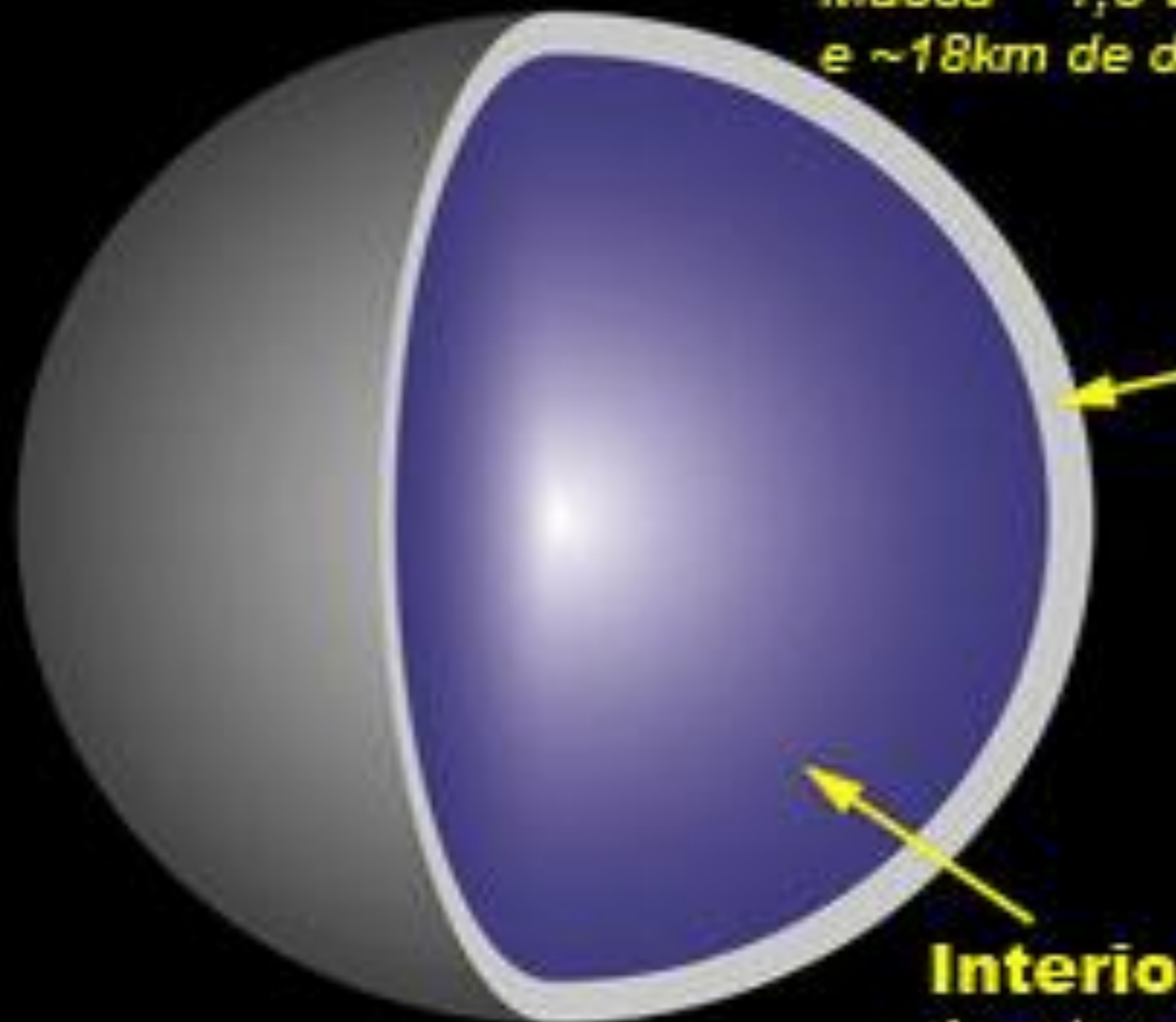
A densidade em que isto ocorre é da ordem da densidade dos núcleos dos átomos: 10^{15} g/cm³.

Para calcular a estrutura de uma estrela deste tipo temos que construir a equação de estado adequada, levando em conta todas as interações dominantes entre todos os tipos de partículas existentes.

Uma Estrela de Nêutrons com $1 M_{\odot}$ tem um raio de apenas 10 Km. Ela tem uma crosta cristalina de centenas de metros e uma atmosfera de alguns centímetros de espessura. A gravidade na superfície é de 100 bilhões de vezes à da superfície da Terra, de modo que suas mais altas cordilheiras (irregularidades na crosta) atingem apenas alguns centímetros de altura. O campo magnético na superfície de uma Estrela de Nêutrons deve ser bilhões de vezes maior que o de uma estrela normal.

Estrela de Nêutrons

Massa ~ 1,5 vezes maior que o Sol
e ~18km de diâmetro



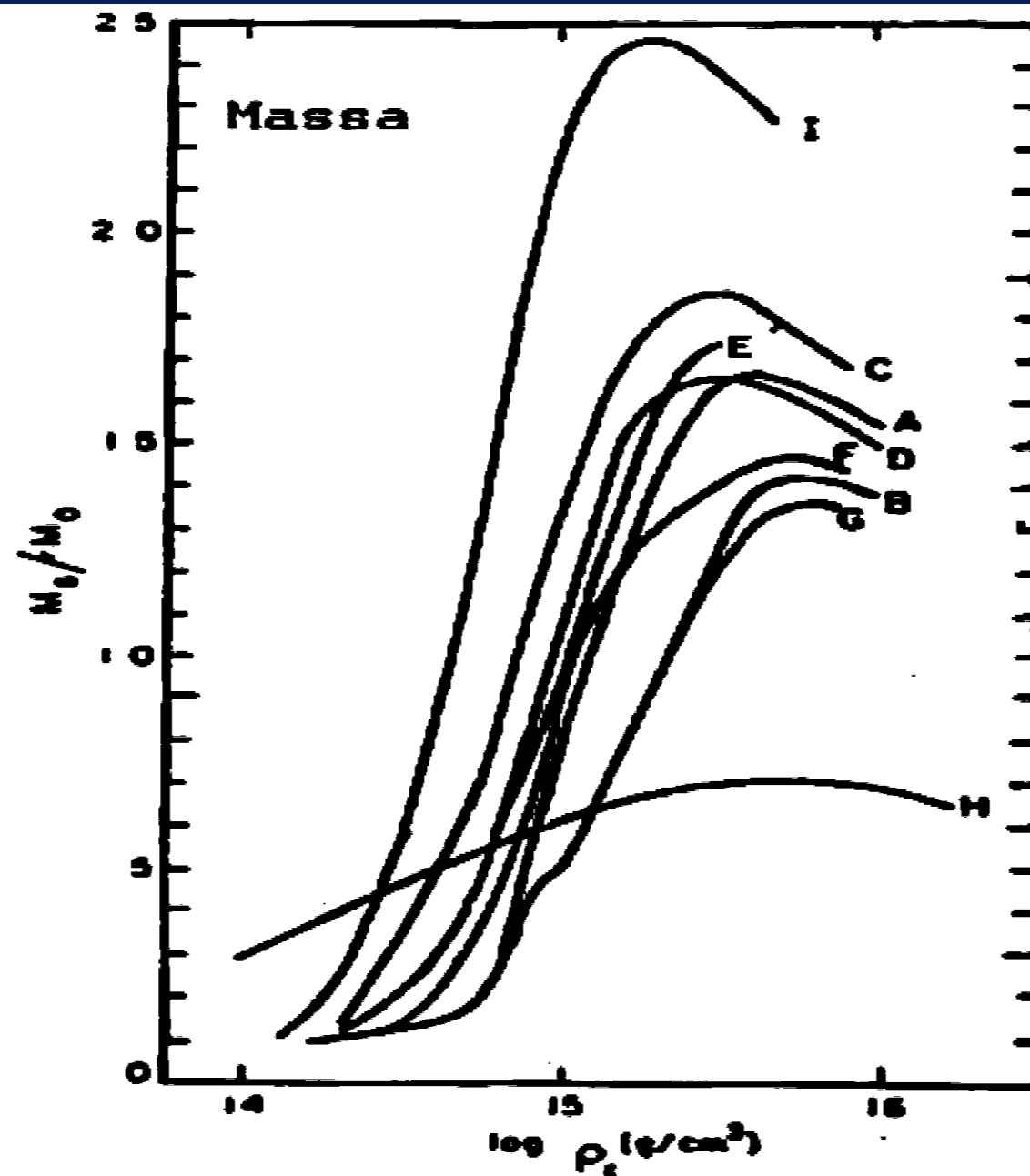
Crosta sólida

~1,5km de espessura

Interior líquido pesado

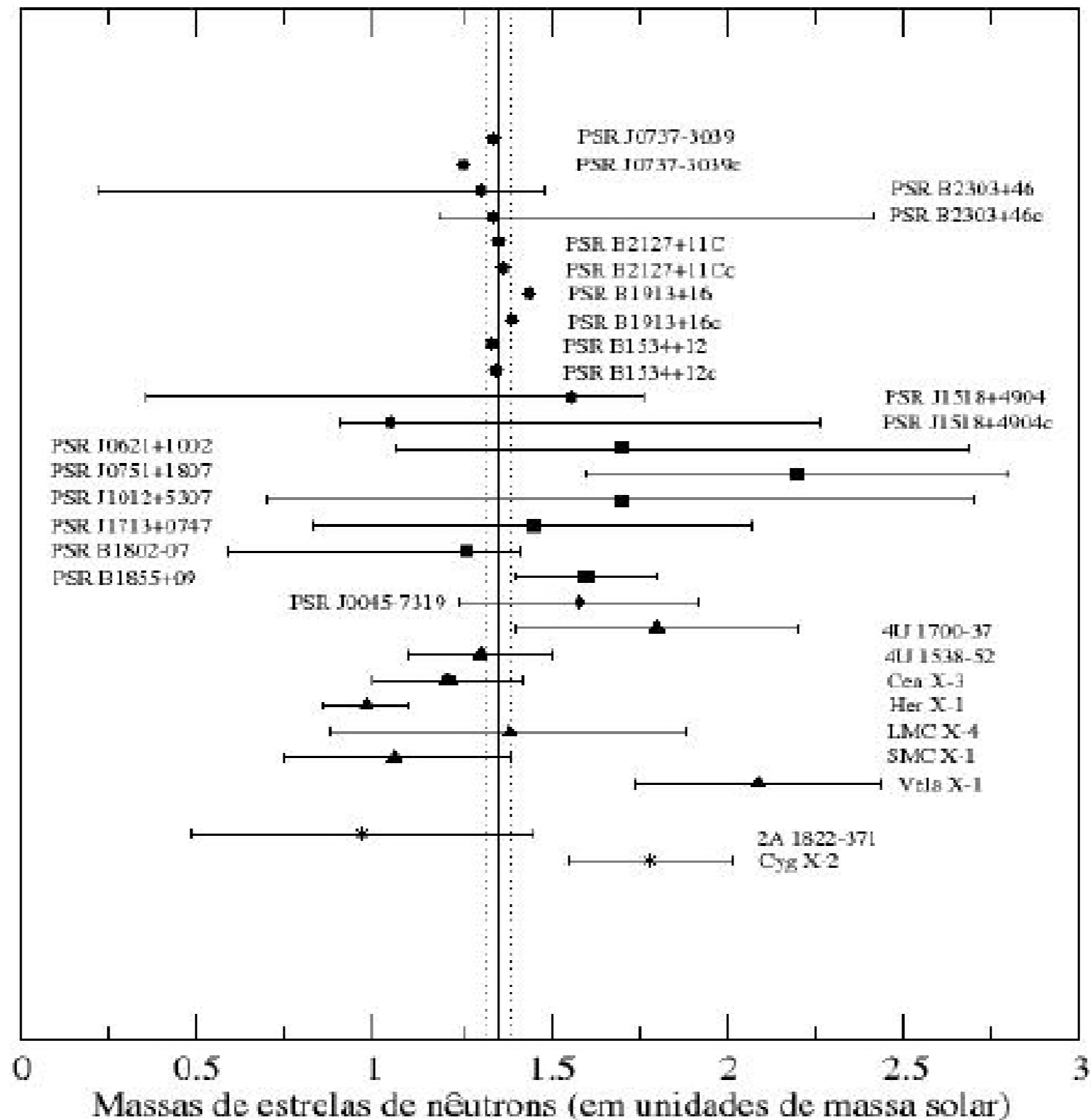
A maior parte de nêutrons
com outras partículas

Curvas correspondentes às equações de estado para as estrelas de Nêutrons



A curva H corresponde ao caso extremo em que os nêutrons seriam livres e não interagem entre si. A curva I, ao caso extremo, em que a interação entre os nêutrons é máxima possível (neste caso a velocidade do som é igual à da luz no meio). As curvas de A a G correspondem a situações intermediárias, levando em conta reações nucleares entre várias partículas elementares. Note como, para todos os casos existe um limite superior para a massa. O limite supremo são de todas as curvas é $2.4 M_{\odot}$.

Massas de Algumas Estrelas de Nêutrons



(VI) pulsares

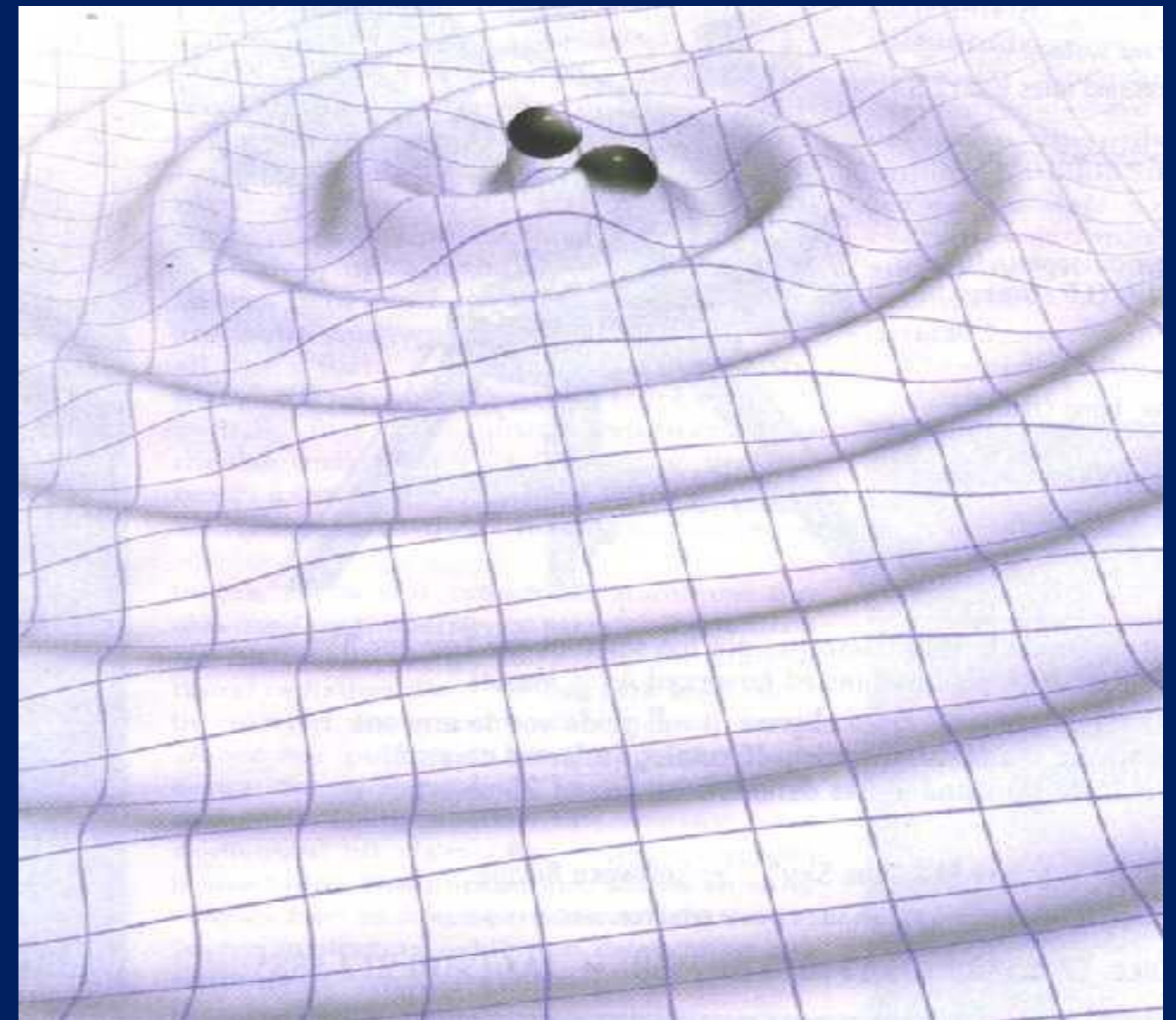
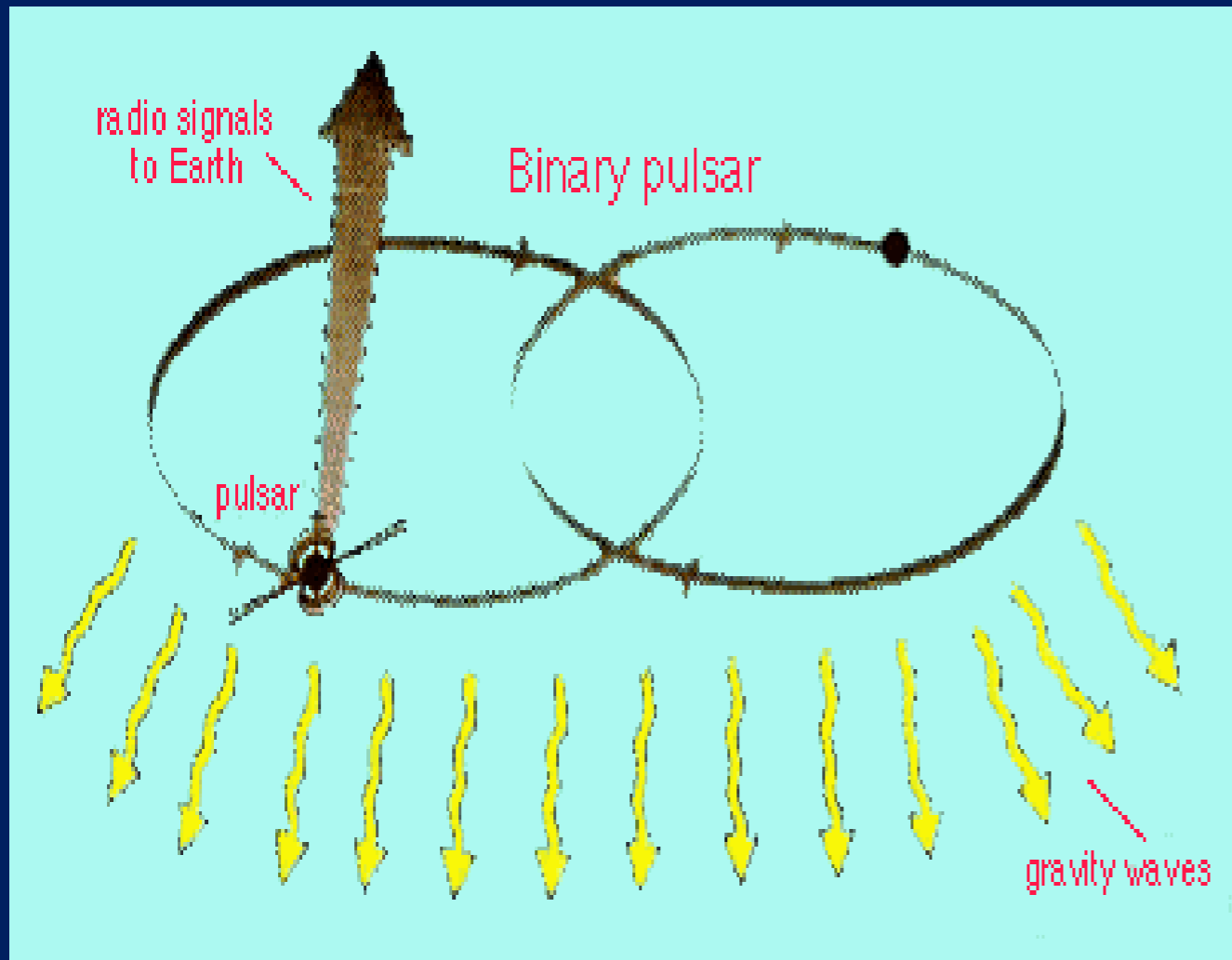
Os pulsares foram descobertos casualmente em 1967 por Joselyn Bell, que era uma estudante de doutorado. Seu projeto de pesquisa, dirigido por Antony Hewish, consistia no estudo do meio interestelar. Queriam estudar pequenas, porém rápidas, variações em sinais de rádio, devidas à mudança nas condições do gás que existe entre as estrelas e esperavam ver variações aleatórias que durariam frações de segundo. Inesperadamente Joselyn, cuja preocupação principal era a de terminar sua tese o mais rápido possível para poder achar algum bom trabalho, encontrou uns pulsos extremamente regulares, como se originassem de um relógio. Cada 1.3 segundos o sinal detectado se repetia. Isto era tão inusitado que a primeira impressão foi que algo estava mal, de que havia algum problema nos instrumentos. Esta idéia foi rapidamente descartada e o transtorno chegou ao ponto de cogitar-se se seriam sinais emitidos por alguma civilização extra-terrestre que queria se por em contato conosco. Joselyn chegou mesmo a dizer: ``..porque logo agora que tenho tanta pressa?''

Sabemos que os pulsares são de fato estrelas de nêutrons e que giram muito rapidamente sobre o seu eixo. Os modelos de computador nos dizem que têm uma massa 40% maior que a do Sol contida em um diâmetro de apenas 20 quilômetros. Isto significa que um cubo de um centímetro de lado desta matéria pesa 100 milhões de toneladas. As estrelas de nêutrons se acham no limite da densidade que pode ter a matéria: o passo seguinte é um buraco negro.

Pulsares: Relógios cósmicos

- Sua densidade dá lugar a campos gravitacionais só superados pelos buracos negros, porém mais fáceis de se medir.
- O mais rápido dos pulsares dá 600 voltas sobre seu eixo em um segundo. Para tanto, sua superfície (um ponto do seu equador) roda a 36.000 quilômetros por segundo.
- Em alguns casos a regularidade de suas pulsação é igual ou maior que a precisão dos relógios atômicos - os melhores que temos. Existem propostas para empregar alguns pulsares como padrões para medição de tempo.
- O pulsar binário de nome PSR1913+16, um sistema de duas estrelas de nêutrons girando uma ao redor da outra, é um laboratório único para provar a teoria geral da relatividade formulada por Einstein há 80 anos

Pulsar Binário



(VII) Exercícios de Aplicação

- 1) Qual a densidade média de uma estrela de nêutrons?
- 2) Qual o valor da aceleração da gravidade *em uma estrela de nêutrons*?
- 3) Considere um pulsar com 1,4 massa solar e diâmetro de 20 km. Considerando o diâmetro do sol de 1.4 milhão de quilômetros, qual a razão entre a aceleração da gravidade na superfície do sol e na superfície desse Pulsar?

4) O mais rápido dos pulsares dá 600 voltas sobre seu eixo em um segundo. Para tanto, sua superfície (um ponto do seu equador) roda a 36.000 quilômetros por segundo.

a) Qual o período de rotação do Pulsar?

a) Qual a sua velocidade angular?

a) Qual o raio do pulsar?

a) Qual a ordem de grandeza da resultante centrípeta que atua em uma massa de 1kg que se encontra na superfície do Pulsar?

(VIII) bibliografia

- CATTANI, M. Gravitational Waves II: Emitting Systems.
- D'AMICO, F. Estágios Finais de Estrelas, INPE-7177-PUD/38.
- DAMINELE, A NETO e JABLONSKI, F. O Nascimento das estrelas.
- AMÂNCIO C.S. FRIAÇA. *"Astronomia: Uma Visão Geral do Universo"* Edusp, 2000.
- SCIENTIFIC AMERICAN, edição especial: Stephen Hawking, Em Busca do Segredo do Cosmos.