

Современные проблемы геологии

- «Изотопный» взгляд на проблему

Некоторые закономерности изотопного состава (относительной распространенности изотопов) химических элементов.

1) Вероятность существования четно-четных изотопов максимальна, нечетно-нечетных – минимальна:

Z	N	A=Z+N	число	доля изотопов в природе
Четное	Четное	Четное	157	59 %
Четное	Нечетное	Нечетное	53	20 %
Нечетное	Четное	Нечетное	50	19 %
Нечетное	Нечетное	Четное	4	1.5 %

2) Распространенность химических элементов с четными Z гораздо больше, чем соседних элементов с нечетными Z :

Z (номер клетки в Периодической системе)	элемент	космическая распространенность, усл. ед.
8	O	$2.01 \cdot 10^7$
9	F	$8.43 \cdot 10^2$
10	Ne	$3.76 \cdot 10^6$
11	Na	$5.70 \cdot 10^4$
12	Mg	$1.08 \cdot 10^6$
13	Al	$8.49 \cdot 10^4$
14	Si	$1.00 \cdot 10^6$
.....

3) Распространенность изотопов с «магическими числами» Z и N (2, 8, 20, 54, 82, 126) гораздо больше, чем соседних изотопов тех же элементов, например:

${}^4\text{He}$ Z=2 и N=2 – «дважды магическое атомное ядро»

${}^3\text{He}$ Z=2, N=1 – нет,

${}^{16}\text{O}$ Z=8 и N=8 – «дважды магическое атомное ядро»

${}^{17}\text{O}$ Z=8 и N=9 – нет,

поэтому

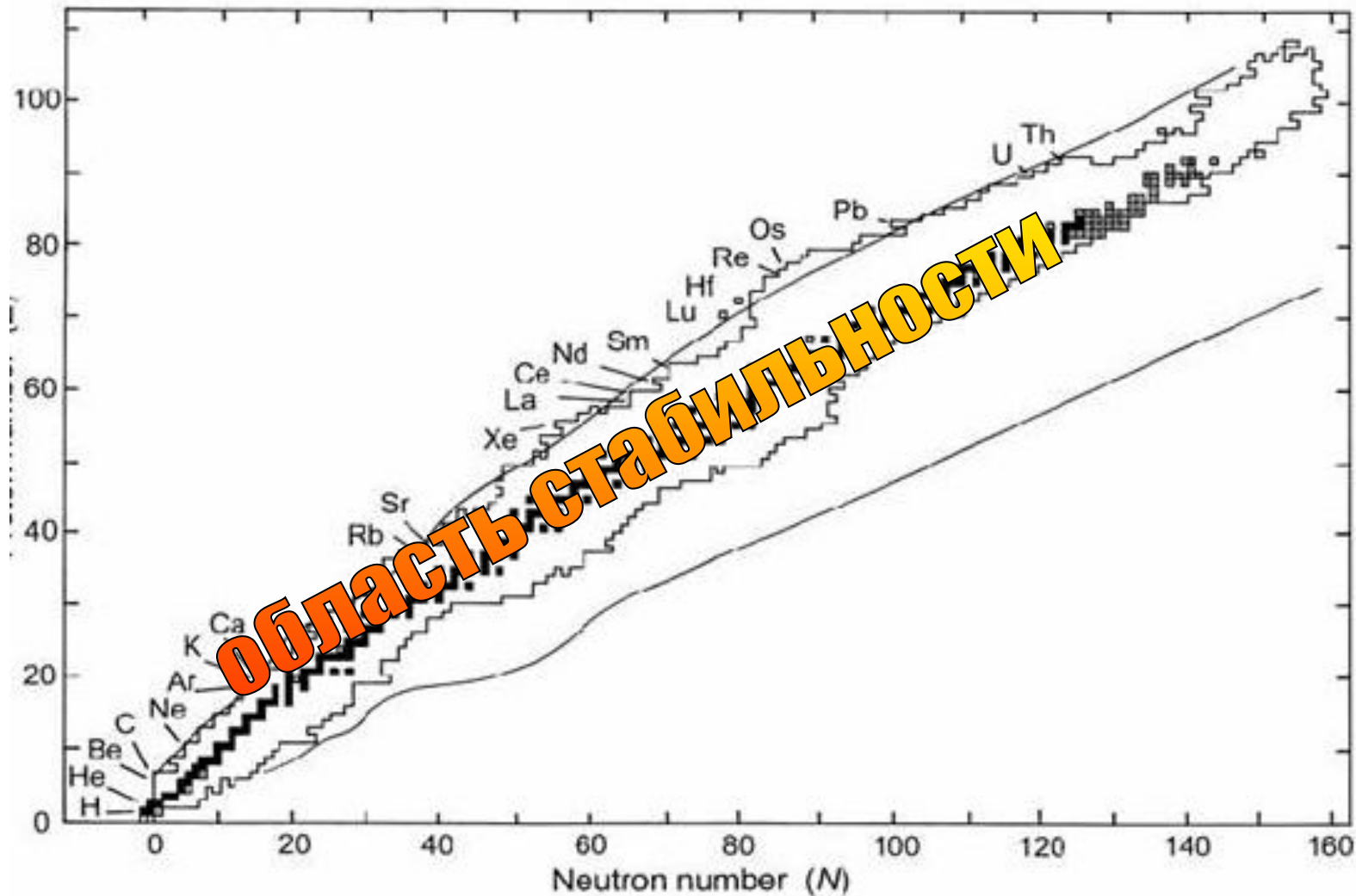
$$\frac{{}^4\text{He}}{{}^3\text{He}} = n \cdot 10^4$$

поэтому

$$\frac{{}^{16}\text{O}}{{}^{17}\text{O}} = 2.7 \cdot 10^3$$

Распространенность изотопов химических элементов в Солнечной системе
Стабильными являются ядра в которых число нейтронов и протонов
приблизительно одинаково.

**Ядра с х.э. избытком или дефицитом нейтронов являются
нестабильными и распадаются в стабильные ядра других х.э. с
выделением энергии.**



Видимое вещество во Вселенной сконцентрировано в скоплениях галактик, галактиках, которые состоят из звездных систем. В пределах галактик отмечена существенная вариация плотности звезд: больше в центре.



Направление движения и скорости галактик друг относительно друга впервые определил Хаббл. Для определения направления и скорости он применил принцип Допплера: удаляющийся объект излучает в более длинноволновой области спектра, а приближающийся- в более коротковолновой, причем пропорционально скорости.

Открытие Хаббла- большинство галактик разбегаются со скоростью тем большей, чем она от нас дальше $V > 200$ км/с (редкое исключение- приближающаяся к нам М-31 ТА, $V = 200$ км/с).

Выводы из данных Хаббла:

- Вселенная расширяется**
- Раньше эта скорость была выше (более удаленные, а следовательно древние удаляются быстрее)**
- На раннем этапе Вселенная была материальной точкой и время прошедшего с этого момента поддается расчету. По современным данным Большой Взрыв произошел около 18 – 20 млрд. лет тому назад.**
- Возраст Солнечной системы – 4,6 млрд. лет, следовательно Солнце – звезда 3-4 поколения, образовалось за счет вещества предшественников.**

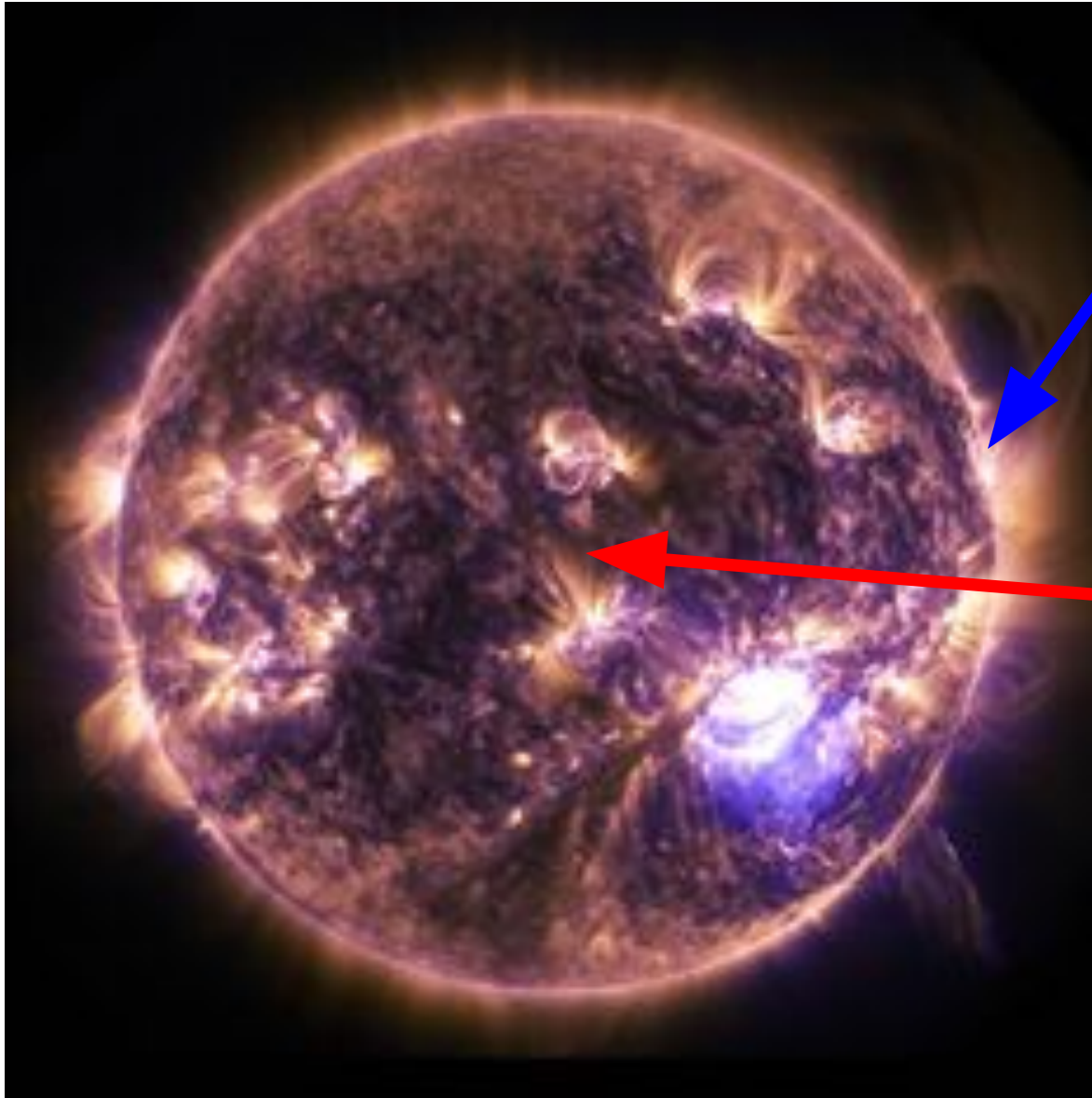
На базе этих данных и с учетом следствий из теории относительности Эйнштейна, построена теория Большого Взрыва (Гамов, Вильсон).

Как образуются химические элементы во Вселенной?

Согласно теории Большого взрыва Вселенная возникла из сингулярной точки (материальная точка с массой Вселенной) 18 – 20 млрд.лет тому назад.

- **При Большом Взрыве** прежде всего формируются атомы водорода – протия и в меньшей степени дейтерия (третий распадается за 12 лет в ${}^3\text{He}$).
- $p^+ + e^- \rightarrow {}^1\text{H}$ (протий)
- $p^+ + n + e^- \rightarrow {}^2\text{H}$ (D-дейтерий) (термически неустойчиво, поэтому мало)
- $p^+ + n + n + e^- \rightarrow {}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$ (Т-третий 12,5 лет)
- $p^+ + p^+ + n + n + e^- + e^- \rightarrow {}^3\text{He}$
- ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$ (ТЯ реакция + 1,44 МэВ)
- ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (ТЯ реакция + 5,49 МэВ)
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$ (ТЯ реакция + 12,85 МэВ)
- ${}^2\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3\text{He}$ (термически неустойчив)
- ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He}$
- ${}^3\text{He} + p^+ \rightarrow {}^4\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + p^+$ ($<10^{-6}$ с)
- ${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + p^+$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p^+$
- ${}^4\text{He} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^5\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ ($<10^{-6}$ с)
- ${}^4\text{He} + n \rightarrow {}^5\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ ($<10^{-6}$ с)
- ${}^4\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li}$
- ${}^4\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Li}$
- ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ ($<10^{-6}$ с)

Термоядерные процессы в звездах



Солнце

$T = 6000-7000 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T = 15-20 \text{ млн } ^\circ\text{C}$

**Существуют
условия
протекания
термоядерных
реакций синтеза**

В звездах реализуются три основные ядерные цикла:

1. протон-протонная реакция:

Эта реакция имеет место в большинстве звезд, **имеющих массу от 1.5 М \odot и менее**, на стадии главной фазы жизни звезды, в течение 7-15 млрд.лет.

Для того чтобы такая реакция имела место должно быть выполнено два независимых условия: Один из сталкивающихся протонов должен иметь кинетическую энергию, превышающую не менее, чем в 20 раз среднюю тепловую энергию атомов водорода при температуре звездных недр. Только $1/100 \cdot 10^6$ часть протонов может иметь такую энергию, необходимую для преодоления "кулоновского барьера" (1Мэв). За время столкновения один из сталкивающихся протонов должен успеть за время столкновения 10^{-21} сек. успеть превратиться в нейтрон по схеме: $p^+ \rightarrow n + e^+$

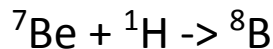
Это и есть условие неупругого столкновения протонов, и может реализоваться для сталкивающейся пары только раз в 10^{10} лет.

${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu$ +1.44 Мэв (10^{10} лет) соударения протонов в основном упругие, но и протонов много

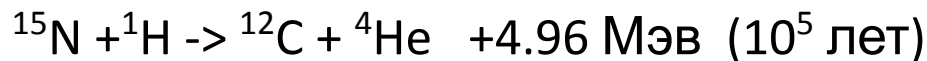
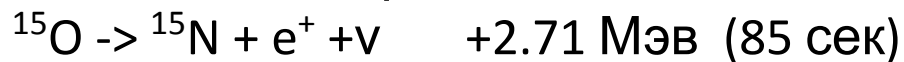
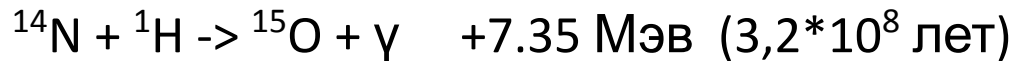
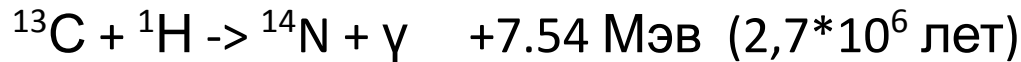
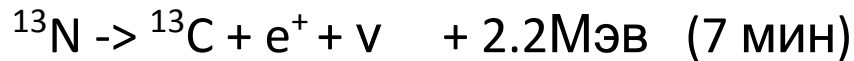
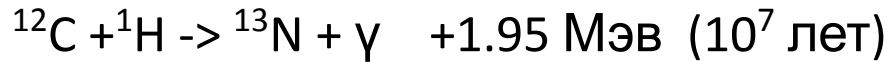


Не вся энергия передается звезде в виде фотонного излучения, определяющего светимость, а часть уносится с нейтрино.

Далее: ${}^3\text{He} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^7\text{Be}$



2. углеродно-азотный цикл:

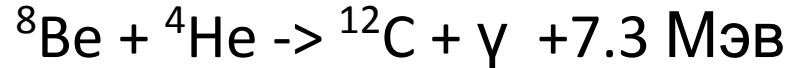


В этой реакции углерод не расходуется а служит катализатором реакции, опять таки расходуется водород и накапливается гелий.

Для реализации этой реакции требуется **температура в ядре не менее $25 \cdot 10^6 \text{C}$, что может быть реализовано в массивных звездах $M > 2 M_{\odot}$.**

Кроме того такая реакция может протекать и в ядрах умирающих звезд при их коллапсе, когда запасы водорода подходят к концу и уже синтезировано большое количество более тяжелых ядер.

3. Тройная гелиевая реакция:



Может реализовываться в гелиевых ядрах умерших звезд – белых карликов, однако ее **вероятность довольно низка, поскольку для ее реализации требуются температуры более $100 \cdot 10^6 \text{C}$.**

При реакциях термоядерного синтеза не могут образовываться ядра тяжелее железа.

у звезды должно существовать горячее ядро в котором происходят ТЯ реакции, часть энергии уносится с нейтрино и звезде не передается, а часть переносится в виде излучения во внешнюю конвективную зону: это и есть схема живой звезды с массой не более 2М \odot .

Скорость протекания ТЯ реакций зависит от температуры.

Если сравнить зависимость скорости реакций от температуры, то очевидно, что **чем массивнее звезда, тем быстрее она израсходует запасы водорода,** синтезировав ${}^4\text{He}$.

Для звезд с массой около М \odot время горения составляет около 8-10 млрд.лет,

для желтых карликов и субкарликов– более 15 млрд.лет.

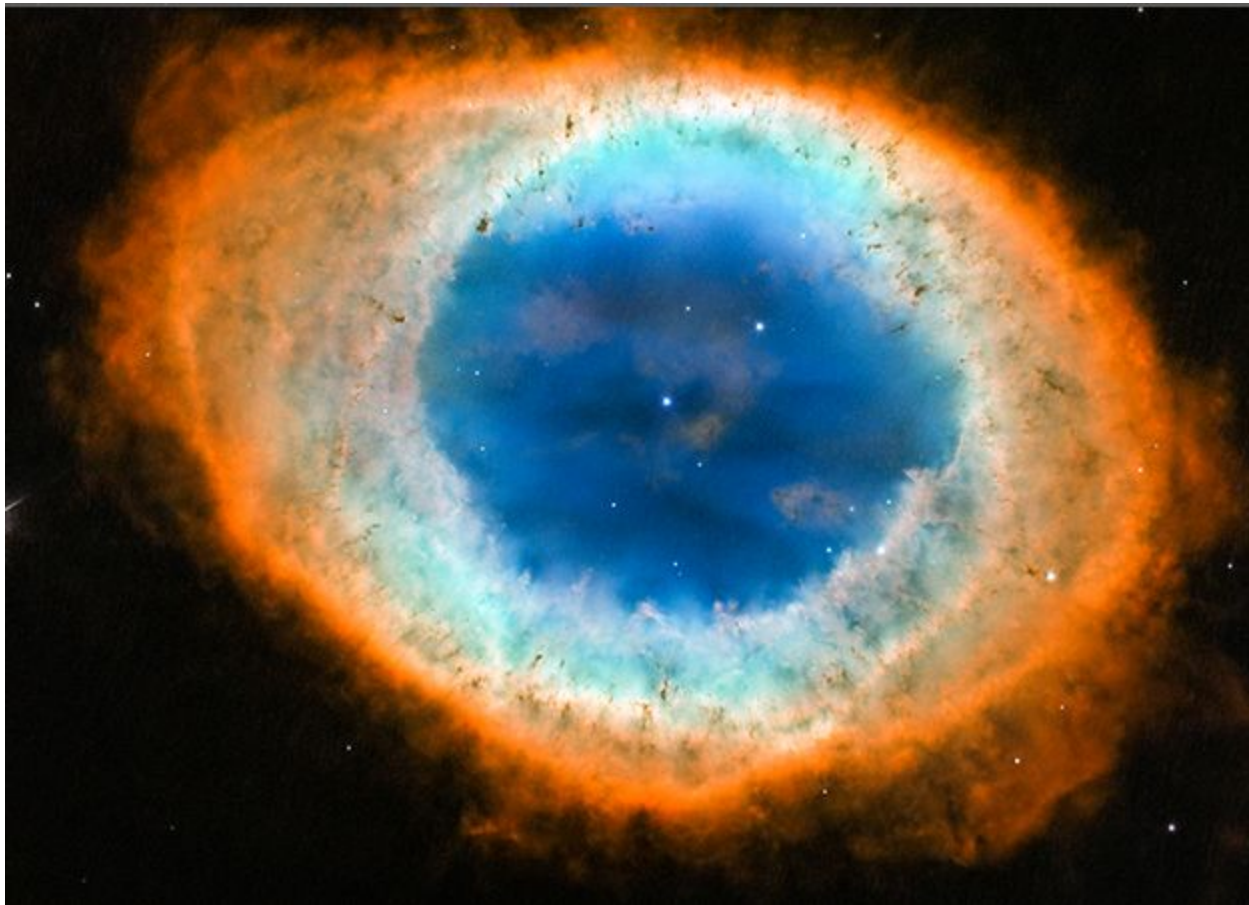
Для массивных голубых гигантов – не более 1 млрд. лет

Что же произойдет, когда запасы водорода подойдут к концу? За время жизни звезды в ядре будет накапливаться гелий ^4He , те в центральных частях ядра ТЯ синтез прекратится и образуется изотермическое гелиевое ядро. Только в очень массивных голубых гигантах возможно протекание на завершающей стадии жизни звезды тройной гелиевой реакции.

Поскольку в центре растет область не выделяющая энергию, температура ядра начинает падать, и во внешней зоне ядра скорости ТЯ падают. Падает мощность излучения и температура, изменяется спектральный класс звезды в ИК область. Если масса звезды более 1.2 M_{\odot} , то образуется **красный гигант.**

В таких красных гигантах в энерговыделяющем слое преобладает азот-углеродный цикл, у более массивных звезд в гелиевом ядре периодически запускается тройная гелиевая реакция, выделяющаяся при этом энергия приводит к кратковременному и катастрофическому перемешиванию энерговыделяющего слоя и внешней конвективной оболочки, которая периодически сбрасывается, образуя туманность, рассеивающуюся за 10^4 - 10^5 лет (Nova stars**).**

**Сброс оболочки красного гиганта –
Новая звезда
(планетарная туманность Кольцо)**



Гелиевое ядро за счет гравитационного сжатия приобретает огромную плотность $-3 \cdot 10^5$ г/см³. При такой плотности электроны у атомов гелия сорваны со своих орбит, и ядро состоит из вырожденного газа. **Выделяющаяся при сжатии гравитационная энергия отводится за счет излучения, образуется белый карлик с массой порядка 1,5 М_☉.**

Для менее массивных звезд $M < 1.2 M_{\odot}$ практически весь водород сгорает, и звезда состоит из одного гелия. За счет гравитационного сжатия выделяется энергия, такие плотные звезды имеют спектральные классы от K до G и называются желтыми карликами.

**После сброса оболочки в центре остается
белый карлик**



Массивные (и короткоживущие звезды ГП) заканчивают свою эволюцию иначе.

Теоретически рассчитано, что **если масса звезды более 1,5 М_☉, то после выгорания всего водорода, давление вырожденного гелиевого газа в ядре не в состоянии остановить гравитационного сжатия звезды.**

Температура в ядре за счет высвобождения гравитационной энергии быстро растет, достигая 5 миллиардов! (10^9) градусов. Запускается тройная гелиевая реакция, дающая дополнительную энергию, и удерживающая некоторое время звезду от коллапса.

После достижения определенных температур высвобождающаяся энергия очень быстро (за время <1 сек) отводится в виде нейтрино, на этой фазе наблюдается короткая нейтринная вспышка (Supernova star).

После вспышки Сверхновой уже нет источников энергии, сдерживающих коллапс, и плотность ядра быстро повышается до 10^{12} - 10^{15} г/см³, а это сопоставимо с плотностью внутри атомных ядер. Атомы гелия распадаются на нейтроны и протоны. Часть протонов соединяется со свободными электронами, и также превращается в нейтроны. Вещество ядра переходит в "Нейтронную жидкость". **Все ядро звезды представляет собой как бы огромное атомное ядро.**

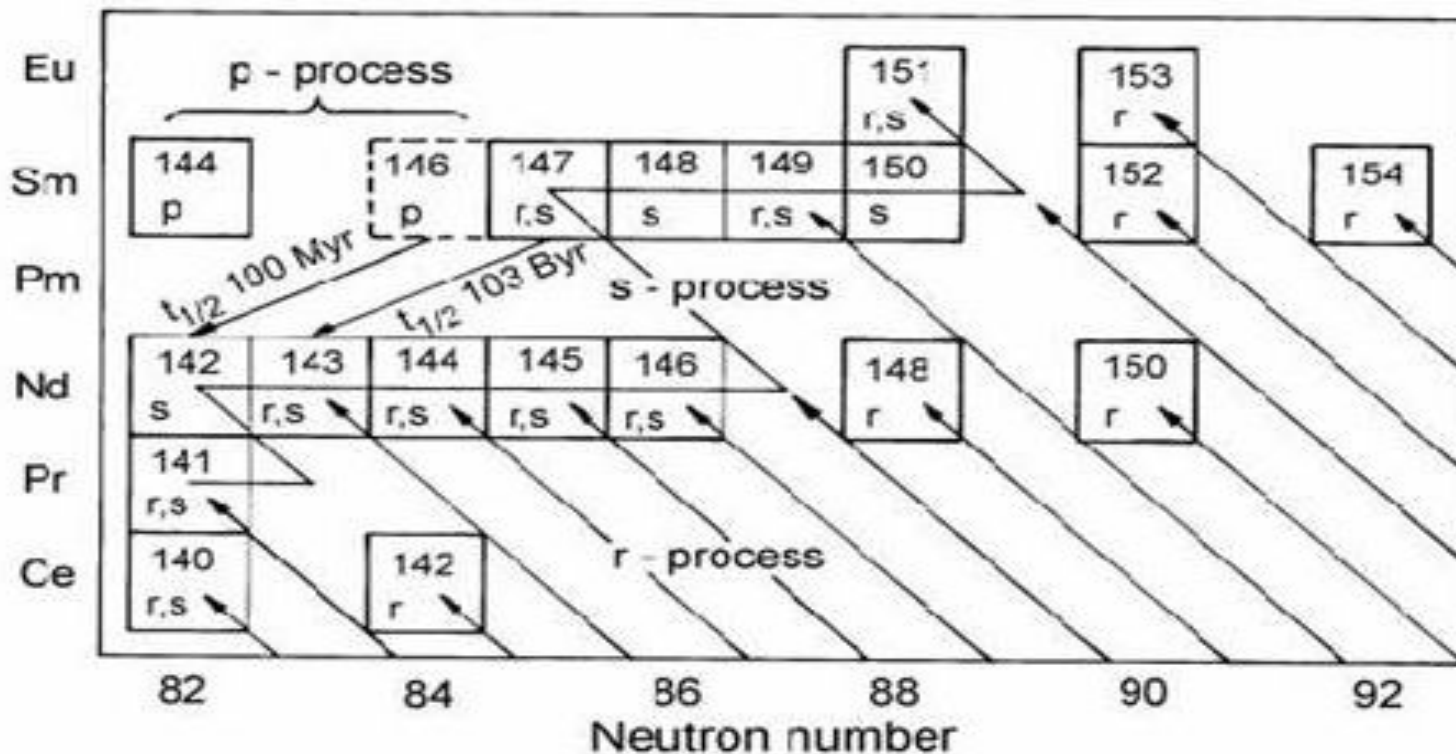
Возникает принципиально отличная ситуация – избыток нейтронов. При этом во внешних оболочках ядра, где плотность ниже начинают происходить реакции нейтронного захвата, по сути синтез ядер химических элементов, причем всех вплоть до самых тяжелых и сверхтяжелых (с атомной массой до 400-500). Сверхтяжелые атомы неустойчивы и очень быстро распадаются на более легкие с выделением колоссального количества энергии, звезда взрывается, сбрасывая внешние оболочки, которые разлетаются во все стороны с огромными скоростями > 10000 км/с. В межзвездной среде возникает ударная волна, и соответственно в газо-пылевых комплексах начинается процесс нового звездообразования.

процессы нуклеосинтеза в оболочке Сверхновой

p- процесс (протон p) захват протонов с образованием ядер тяжелее железа (момент взрыва $<10^{-6}$ сек)

r- процесс (быстрый rapid): захват нейтронов нестабильными ядрами до их полного распада ($<10^{-3}$ сек)

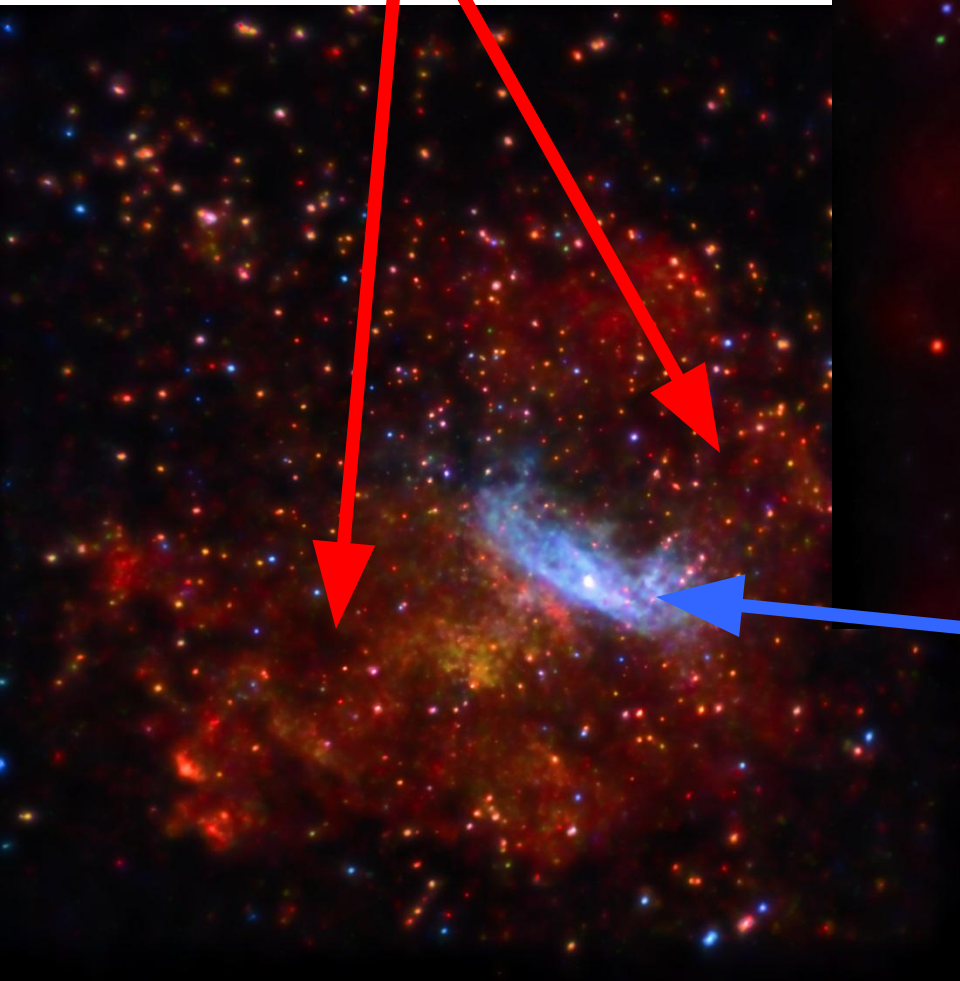
S- процесс (медленный slow): захват нейтронов ядрами после распада их радиоактивного предшественника (0,1 – 1000 сек).



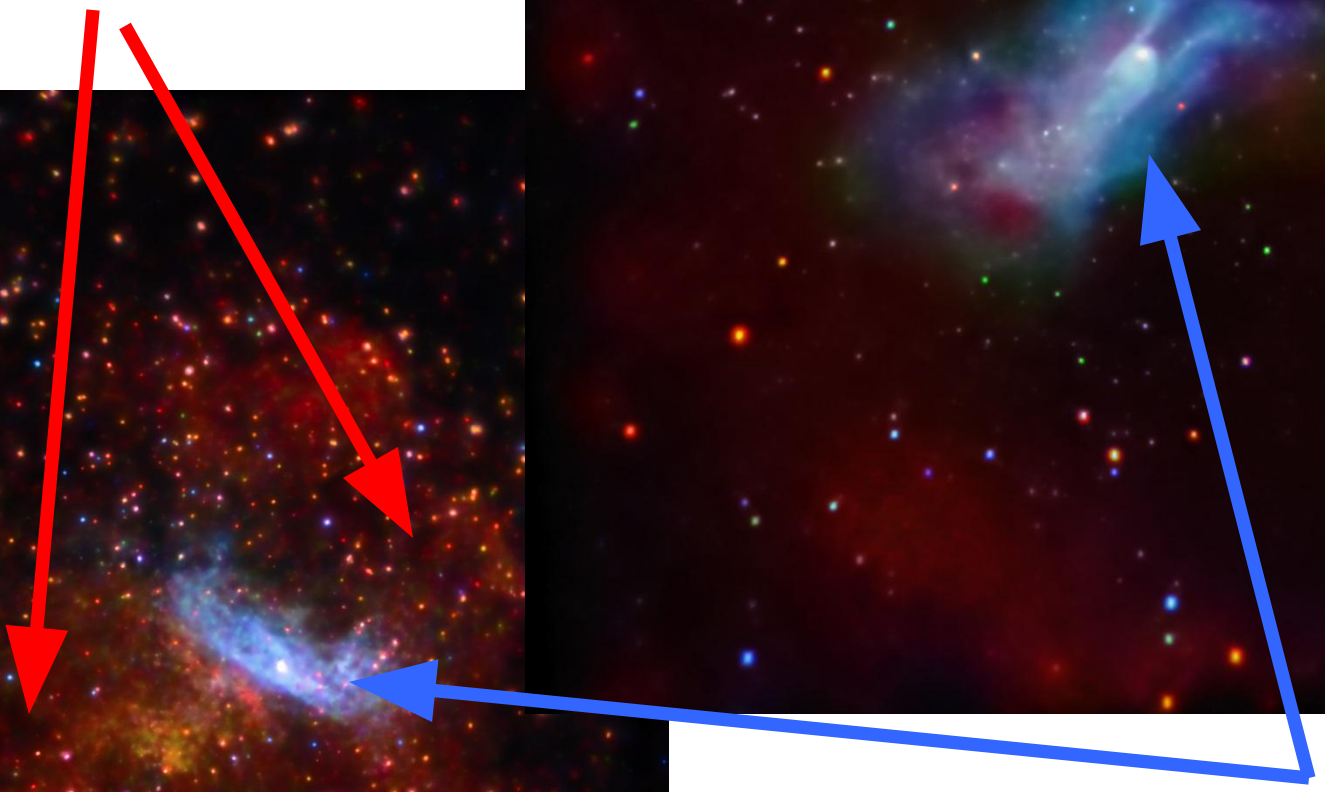


Крабоподобная туманность – остатки сверхновой звезды, вспышку которой обнаружили китайские астрономы в 1054 г. н. э.

**разлетающаяся
оболочка
Сверхновой**



Ядро Сверхновой



**«акт творения» - взаимодействие разлетающейся оболочки
Сверхновой с веществом галактики (туманность Орел) – фото
внеатмосферного телескопа Hubble**

Видимый диапазон



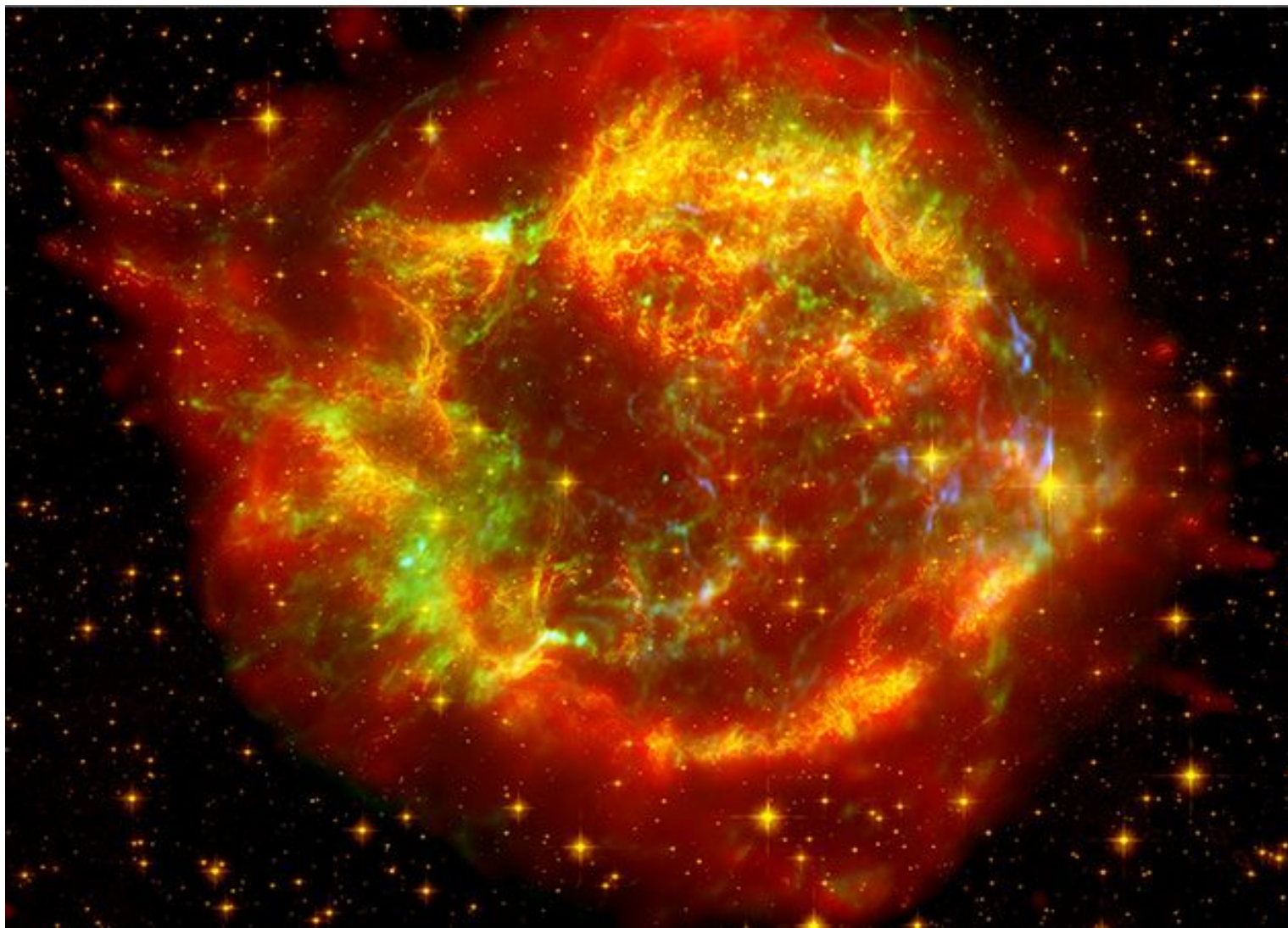
ИК диапазон



Взаимодействие сброшенной оболочки Сверхновой с массивными звездами (Туманность Карина).



Остаток ядра Сверхновой на расстоянии 11 тыс. световых лет



Какими данными мы располагаем о веществе Земли и Солнечной системы?

- Образцы Земных пород.
- Спектральные данные о химическом и изотопном составе Солнца.
- Прямые измерения химической и изотопной распространенности элементов на Солнце – проект Genesis. Изучение компонентов Солнечного ветра имплантированного в пыль Лунного реголита.
- Образцы метеоритов
- Лунные образцы
- Прямые измерения химической распространенности в кометах, астероидах – проекты Vega, Rosetta – Philae и др.

Классификация метеоритов

- **Каменные**

Углистые хондриты C0 – C4

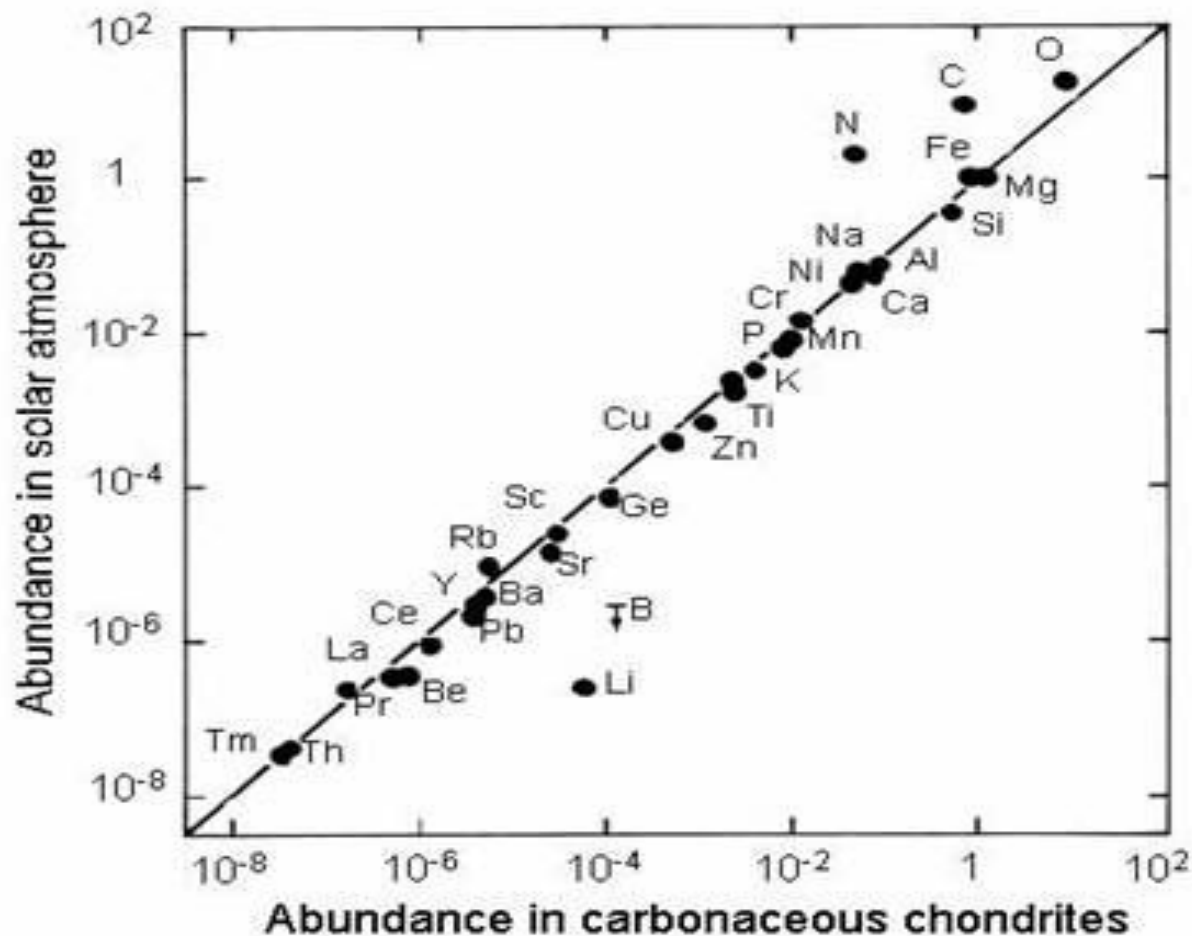
Каменные хондриты LL, L, H (0-5)

Ахондриты

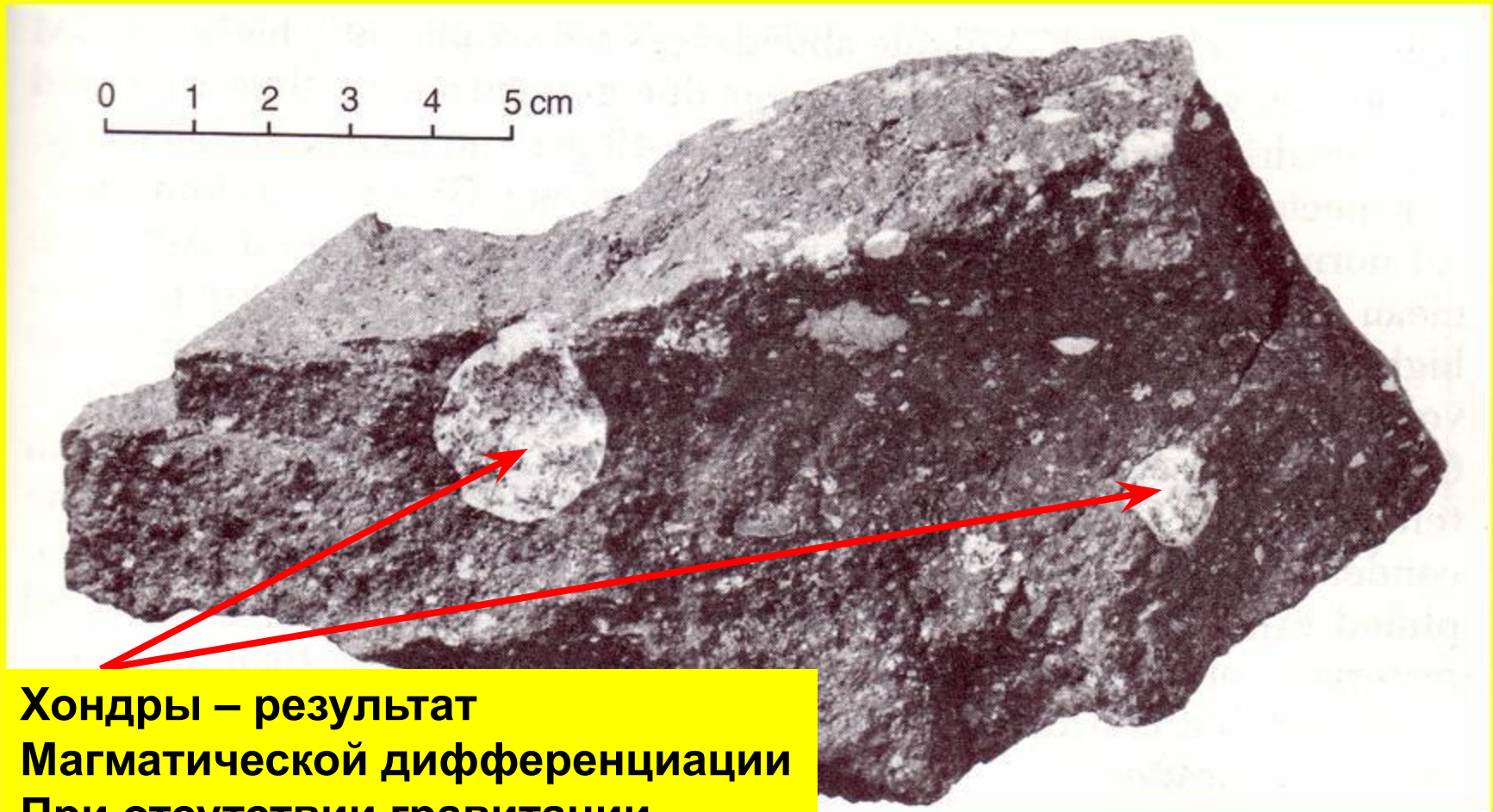
- **Железо каменные**
- **Железные**

Наиболее примитивные –углистые хондриты, остальные классы образуются при магматической дифференциации в относительно крупных телах астероидных размеров.

Примитивные метеориты - углистые хондриты представляют собой фрагменты протопланетного вещества. Для них распределение химических элементов тяжелее углерода такое же как и на Солнце. По ним получены изотопные параметры протоземного вещества CHUR – Chondrite Uniform Reservoir



Осколок метеорита-углистого хондрита Allende, содержащего высокотемпературные белые кальций-алюминиевые включения досолнечного вещества. В нем экспериментально обнаружены и исследованы **изотопные аномалии – свидетельства ядерных процессов при взрыве звезд.**



**Хондры – результат
Магматической дифференциации
При отсутствии гравитации**

Как образуются планеты?

- **Формирование газо – пылевого диска вокруг звезды.**

За счет неоднородности плотности:

- **Диск распадается на дискретные concentric области питания будущих планет**
- **В каждом диске конденсируется твердое вещество в виде тел астероидных размеров 1-100 км. Эти тела называются планетозимали.**
- **Происходит слипание планетозималей – процесс аккреции планеты.**
- **И все это, от образования Солнечной системы, до существования дифференцированных планет (с ядром, мантией, протокорой и атмосферой, по изотопным данным, всего за 20-50 млн.лет.....**

Поздняя аккреция:

- **Процесс аккреции затухает по экспоненциальному закону, продолжается и сейчас: современный темп аккреции Землей космического вещества – около 1000 тонн в год. Основная часть вещества – космическая пыль, частицы менее 100 микрон, которые не сгорают в атмосфере, а поступают на поверхность, аккумулируясь в конечном счете в пелагических осадках океанов.**
- **По пелагическим осадкам установлена циклическая вариация темпа поздней аккреции с главным периодом порядка 100 тыс.лет.**
- **Но были и катастрофические события, надежно установлено, что на границе мел-палеоген, 65 млн. лет тому назад, темп аккреции кратковременно увеличился на пять! Порядков величины. И бедные динозавры этого не пережили.....**

Темп аккреции затухает по экспоненте, следовательно, в хадее и архее был существенно интенсивнее.

Важное значение имеет изучение интенсивной хадей-архейской бомбардировки протокоры: LNB – Late Heavy Bombardment. С этим, в частности, связывают гетерогенность верхней мантии.

Субокеаническая верхняя мантия DM – по геохимическим и изотопным параметрам весьма гомогенна

Сублитосферная континентальная верхняя мантия SCLM – очень гетерогенна.

Две главные гипотезы аккреции

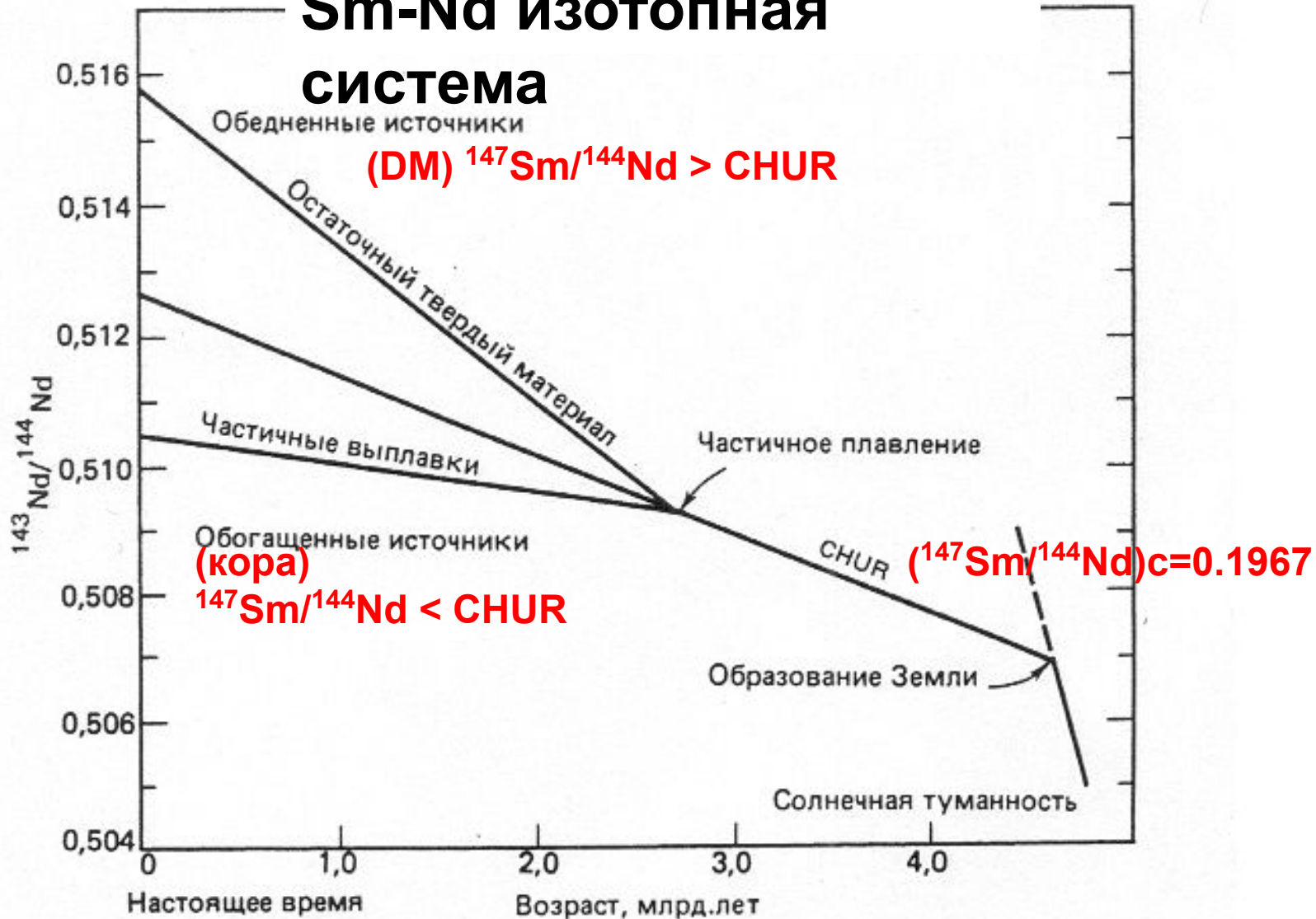
- **Гетерогенная аккреция:** сначала в космосе вещество дифференцировалось с образованием железных астероидов, которые сформировали ядро, каменных хондритов – мантию, ахондритов – кору, комет – атмосферы.
- **Гомогенная аккреция:** планеты образованы из гомогенного вещества типа углистых метеоритов класса C1, затем произошла дифференциация на геосферы.

Современные изотопные данные показывают, что в первом приближении, аккреция была гомогенна, следовательно, все геосферы образованы при дифференциации однородного хондритового резервуара CHUR.

Как получены оценки изотопных параметров Протоземного вещества ?

1. Изучен изотопный состав, соотношения стабильных изотопов главных химических элементов: O, Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na и др. Показано (прежде всего по соотношениям изотопов кислорода), аналогом Протоземного вещества являются примитивные углистые хондриты C1 – это *однородный хондритовый резервуар CHUR*.
2. По коллекциям метеоритов C1 определены изотопные и изотопно элементные соотношения в *однородном хондритовом резервуаре CHUR* для систем долгоживущих радиоактивных изотопов: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ и др.....

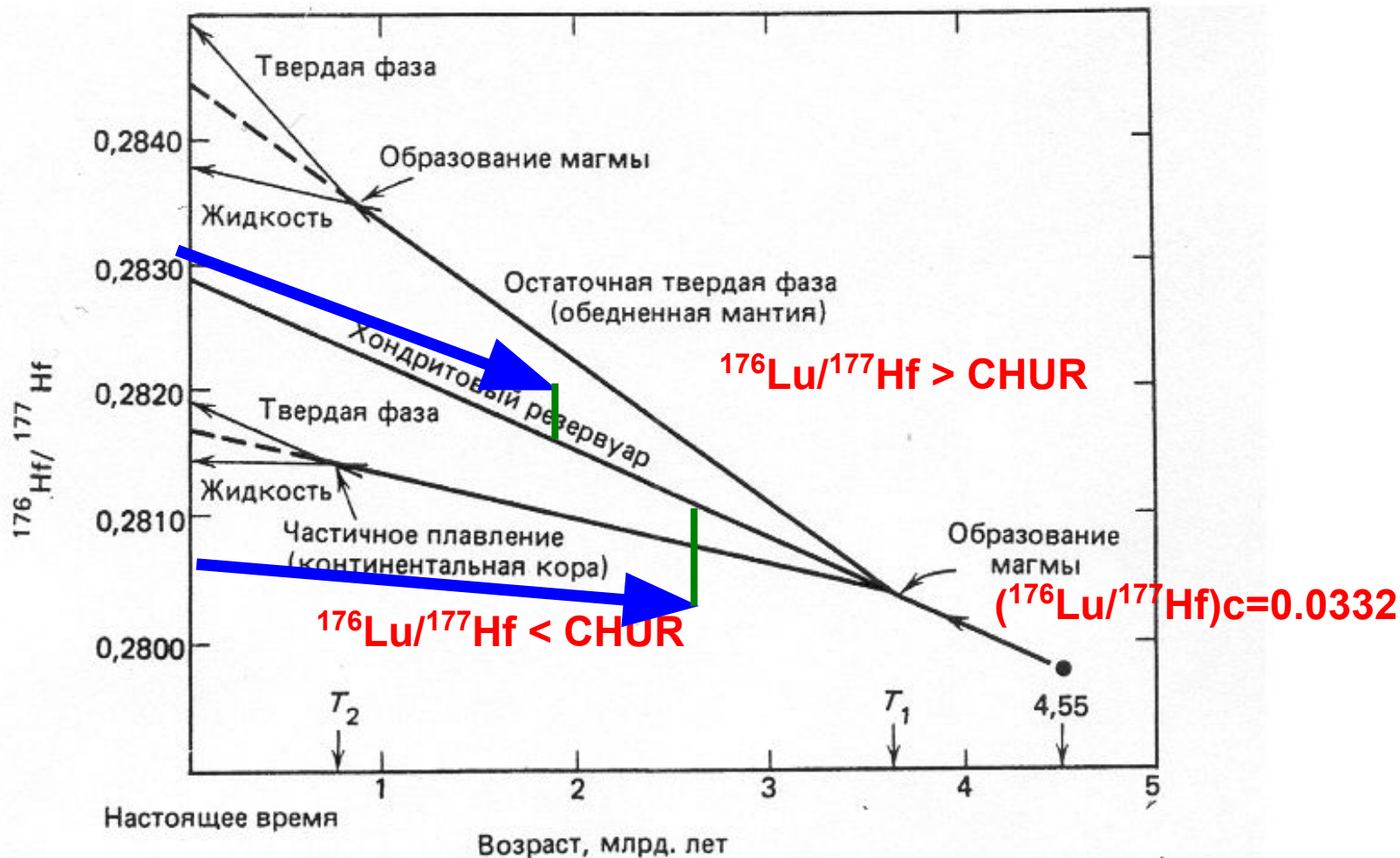
Sm-Nd изотопная система



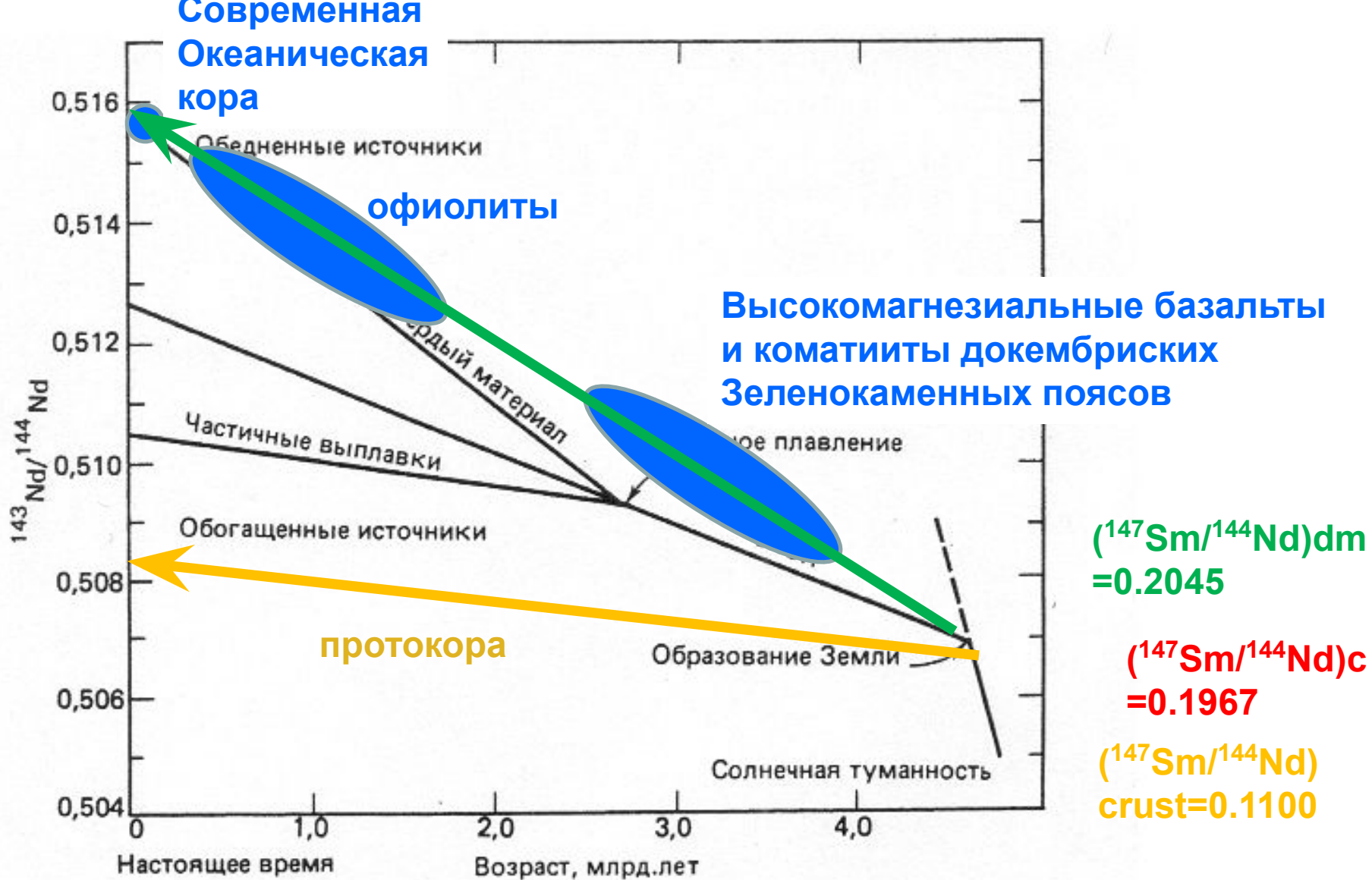
CHUR – однородный хондритовый резервуар, т.е. протовещество Земли, в настоящее время может сохраниться только в недеплетированной (недифференцированной) мантии на глубине более 1000 км.

Определение начального изотопного отношения

СИСТЕМА

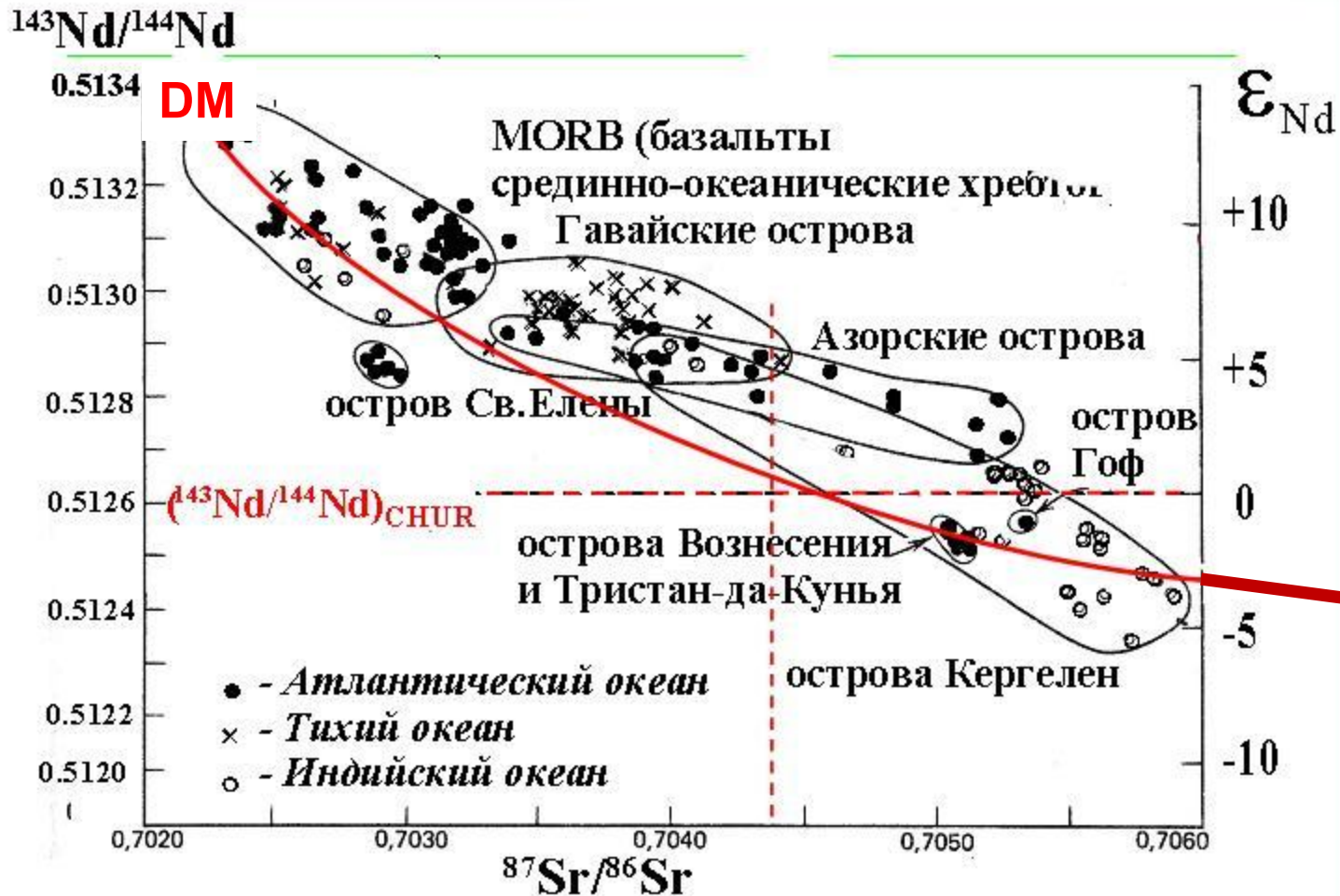


$$\epsilon_{\text{Hf}}(T) = [R(T)_{\text{обр}} / R(T)_{\text{CHUR}} - 1] * 10000$$



Sm-Nd изотопная система: когда образовалась деплетированная мантия и протоко́ра?

Проблемы CHUR и примитивной мантии: 1. по изотопной Sr-Nd систематике в горячих точках (источники в нижней примитивной мантии) НЕТ компоненты CHUR, это м.б. смешение DM и субдуцированного корового вещества.



Проблемы CHUR и примитивной мантии:

2. по изотопной Hf-Nd систематике нет соответствия параметров CHUR, т.е.

$$\epsilon_{\text{Hf}}(T) = \epsilon_{\text{Nd}}(T) = 0$$

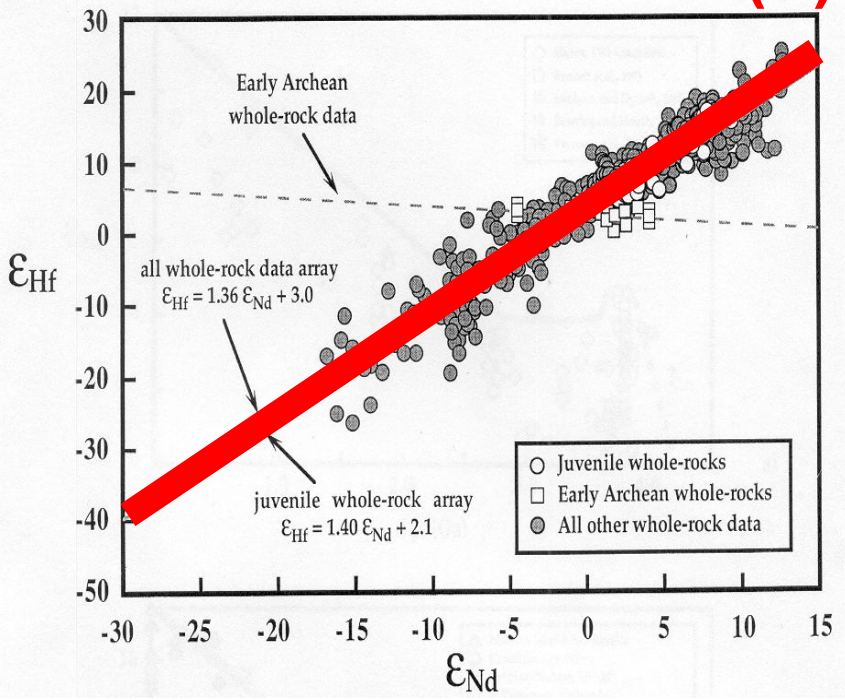
Это м.б. результатом некоторой гетерогенности аккреции.

Глобальная корреляция величин $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$

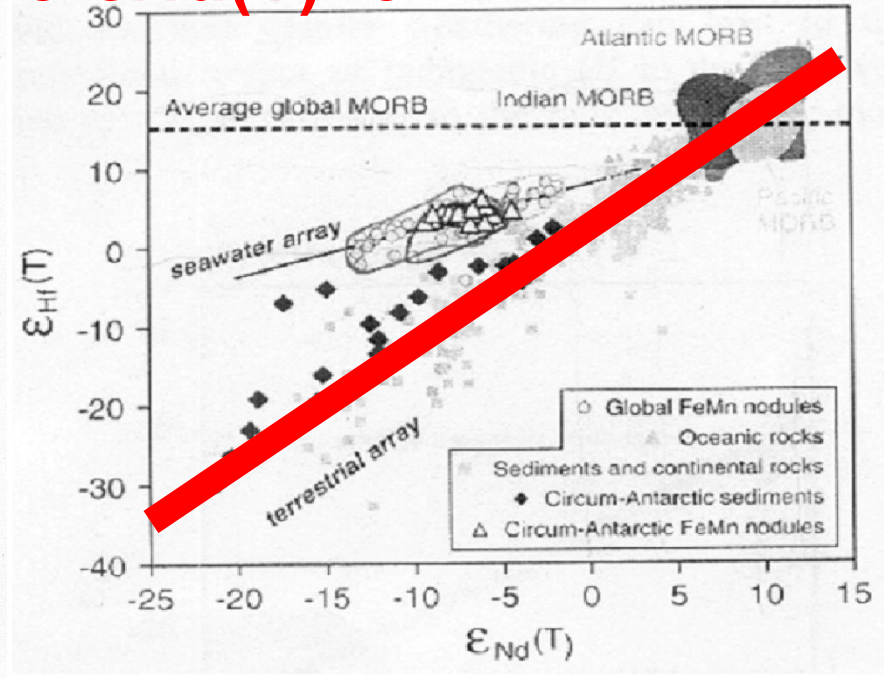
в магматических породах –

земная совокупность “terrestrial array”

$$\epsilon_{\text{Hf}}(T) = 1.5 * \epsilon_{\text{Nd}}(T) + 3$$



Vervoort J.D, Blichert-Toft J, 1999



Van de Flierdt T., e.a, 2007

Проблемы CHUR и примитивной мантии:

3. по изотопной геохимии свинца пород мантийного генезиса, вообще стройная картина однородного хондритового резервуара CHUR рушится!

Например, в ряде островных базальтов есть компонента “Hugh mu”

$\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb} > 15 - 10$, что гораздо выше, чем в породах континентальной коры ($\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb} = 10$).

К данным по изотопной геохимии свинца нужно относиться с осторожностью: При анализе нет возможности корректно осуществить нормализацию на приборное изотопное фракционирование, поскольку свинец имеет лишь один нерадиоогенный изотоп ${}^{204}\text{Pb}$.

Экзосферы планет земной группы: это сумма химических соединений в: атмосфера + гидросфера + хемогенные осадки

- Земля и Венера – сестры близнецы, у них в экзосферах примерно одинаковое количество легких химических элементов: H, C, N, O, S, NG.**
- Земля (20 °C, 1 атм):** гидросфера- H_2O , атмосфера - N_2 , O_2 , Ar + H_2O облачность, хемог. Осадки - $CaCO_3$ и C орг., FeS_2 , $CaSO_4$
- Венера (600 °C, 50 атм):** гидросферы и хемогенных осадков нет, атмосфера: CO_2 + Ar, облачность – H_2SO_4

Когда была образована Земная экзосфера?

- Короткоживущий изотоп йода распадается в изотоп ксенона.



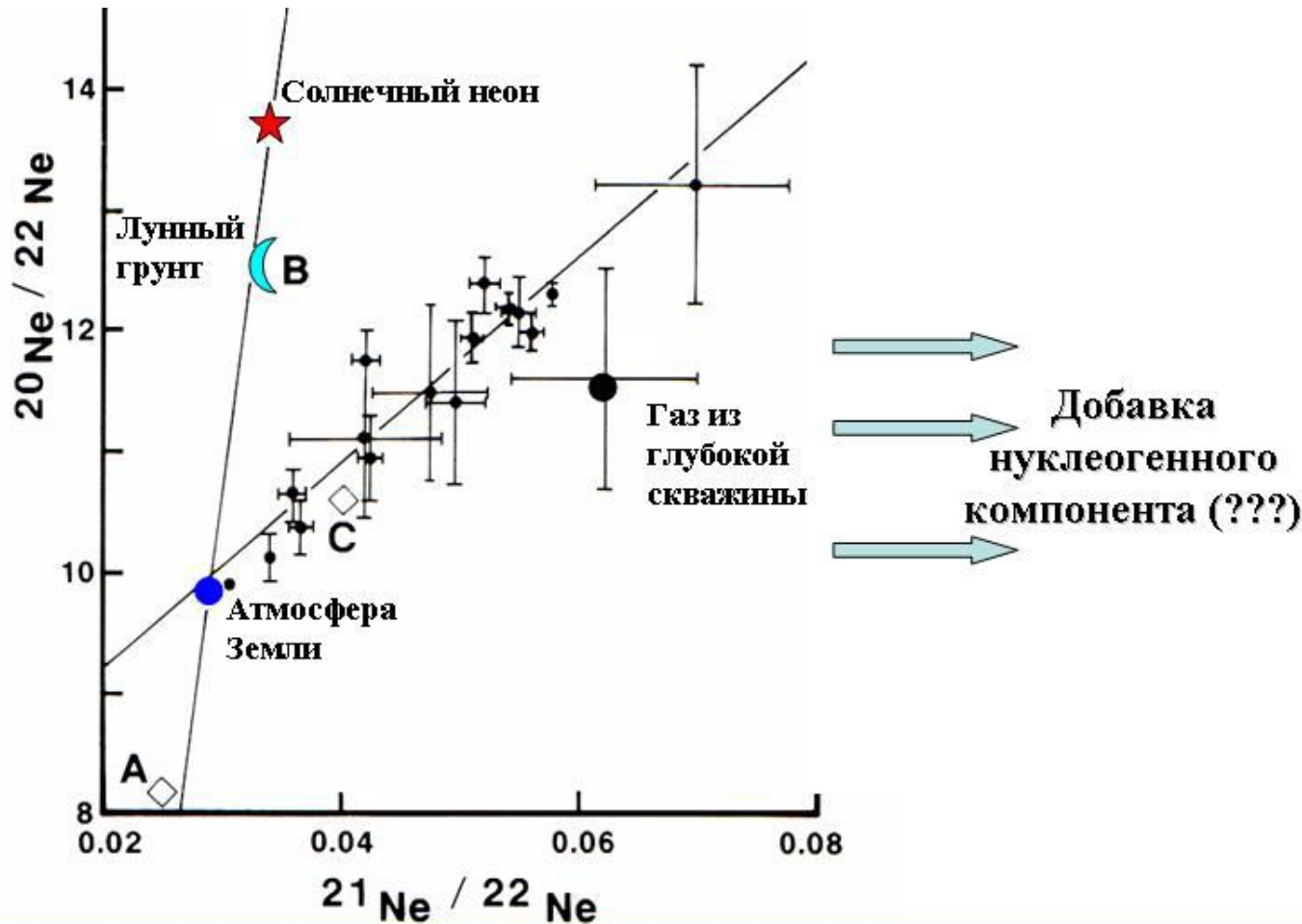
- В атмосфере изотопное отношение $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ на 30% ниже, чем в породах верхней мантии, следовательно, атмосфера (экзосфера) была выделена из мантии до того как распался весь ^{129}I , т.е. не позднее $17 \cdot 5 = 85$ млн.лет с момента нуклеосинтеза.
- Возраст Земной экзосферы порядка 4,5 млрд.лет.

Какой химический состав имела первичная атмосфера, и когда появилась гидросфера?

- Согласно химической распространенности легких элементов в углистых хондритах, первичная весьма массивная атмосфера была похожа на таковых планет- гигантов (Юпитер, Сатурн, Нептун): $\text{H}_2 > 95-99\% + \text{He} + \text{CH}_4 + \text{N}_2$
- Земля своим полем тяготения способна удержать в атмосфере соединения с молекулярной массой более 6. Поэтому водород и гелий теряются в космическое пространство за время порядка 0,1 млн.лет (процесс диссипации).

А была ли диссипация первичной водородной атмосферы?

- Да, изотопный состав азота мантийных пород тяжелее атмосферного азота: $\delta^{15}\text{N morb} = +5 - +8 \text{ ‰ AIR}$.
- Изотопный состав неона Земной атмосферы обогащен тяжелыми изотопами относительно верхней мантии:



Как эволюционировал состав атмосферы?

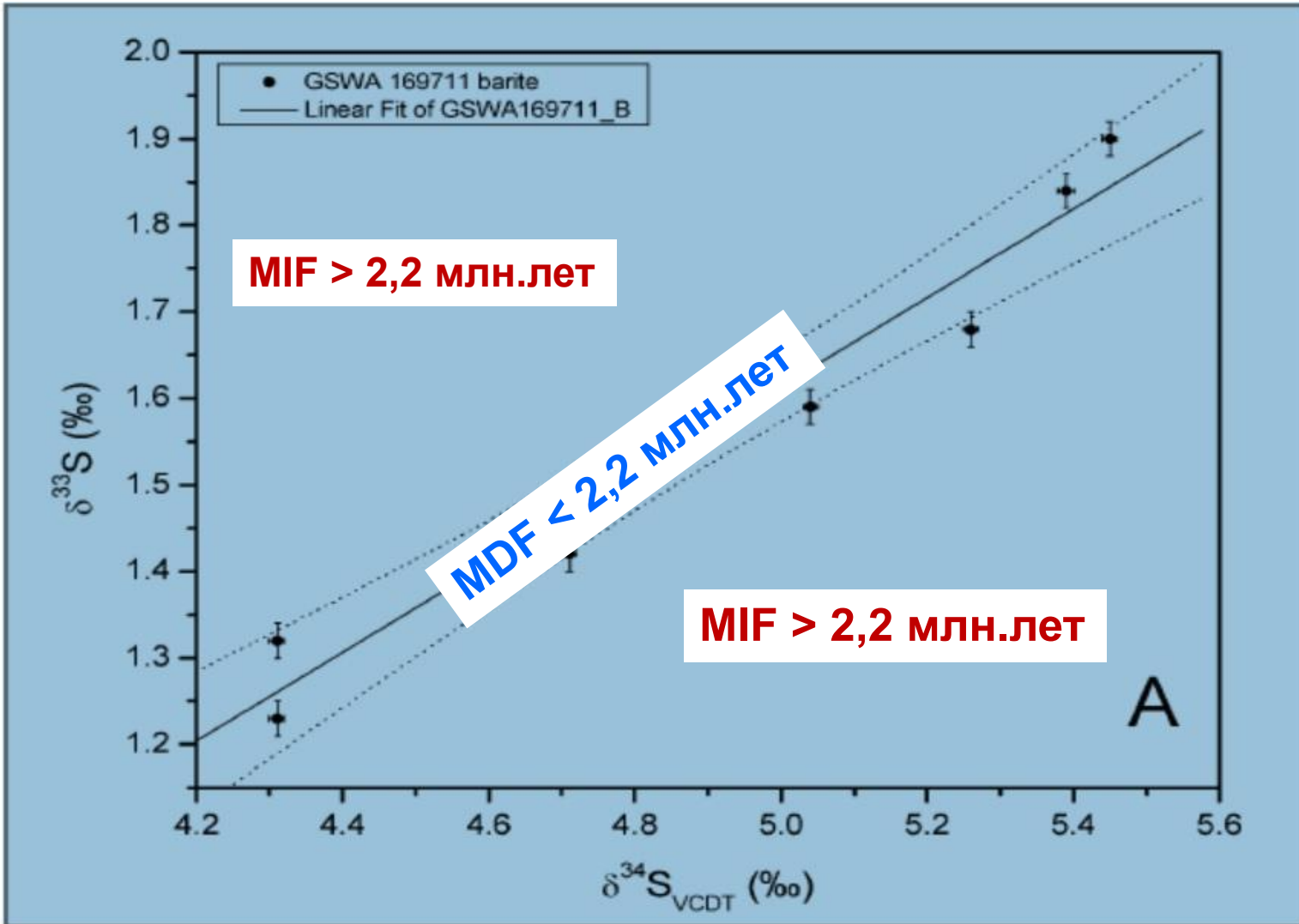
- На рубеже хадей – архей (4.0 млрд.лет) уже существовала гидросфера, что подтверждается изотопным составом кислорода древнейших цирконов в возрасте более 4,2 млрд.лет:

$\delta^{18}\text{O} > (\delta^{18}\text{O})$ в мантии = +4 – +5 ‰SMOW.

Атмосфера была бескислородная, существенно метановая.

- На рубеже 2.4 -2.2 млрд.лет появились первые красноцветные осадочные породы (окисленное железо), что свидетельствует о появлении в атмосфере свободного кислорода – Great oxidation event.

В окисленной водной среде наблюдается масс-зависимое
изотопное фракционирование MDF за счет
 $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{SO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{S} + 3\text{H}^+ + 3\text{HSO}_4^-$
В восстановленных условиях – масс-независимое
фракционирование изотопов серы MIF



Любую из тем данной презентации Вы можете развить в реферате.

Или подготовить презентацию для выступления на семинаре в конце курса (конец декабря).

И Георгий Сергеевич Бискэ оценит Ваши усилия.

Нерешенные и проблемные вопросы:

- Справедлива ли гипотеза о CHUR ?
- Каков возможный вклад доСолнечного вещества в Протовещество Земли? По каким объектам это можно оценить?
- Почему нет соответствия параметров CHUR по изотопным Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf, K-Ar и U-Th-He системам?
- Каковы причины несоответствия океанической DM сублитосферной мантии SCLM?
- Откуда в океанических островах взялся компонент “High mu”?
- Почему в породах океанической верхней мантии DM есть избытки легкого изотопа неона (высокие $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$), в в SCLM нет?
- Роль LHB и процесса поздней аккреции в эволюции Земли. Не является ли это причиной гетерогенности SCLM?
- Какова связь резкого повышения темпа поздней аккреции и массовых вымираний в экзосфере Земли (mass extinctions)?
- Причина возникновения аномалий по легким стабильным изотопам: аномально тяжелый углерод в протерозойских осадочных карбонатах ($\delta^{13}\text{C} > + 15\text{‰}$) и аномально легкий кислород в эндогенных породах ($\delta^{18}\text{O} < - 20\text{‰}$) ?? – your opinion.