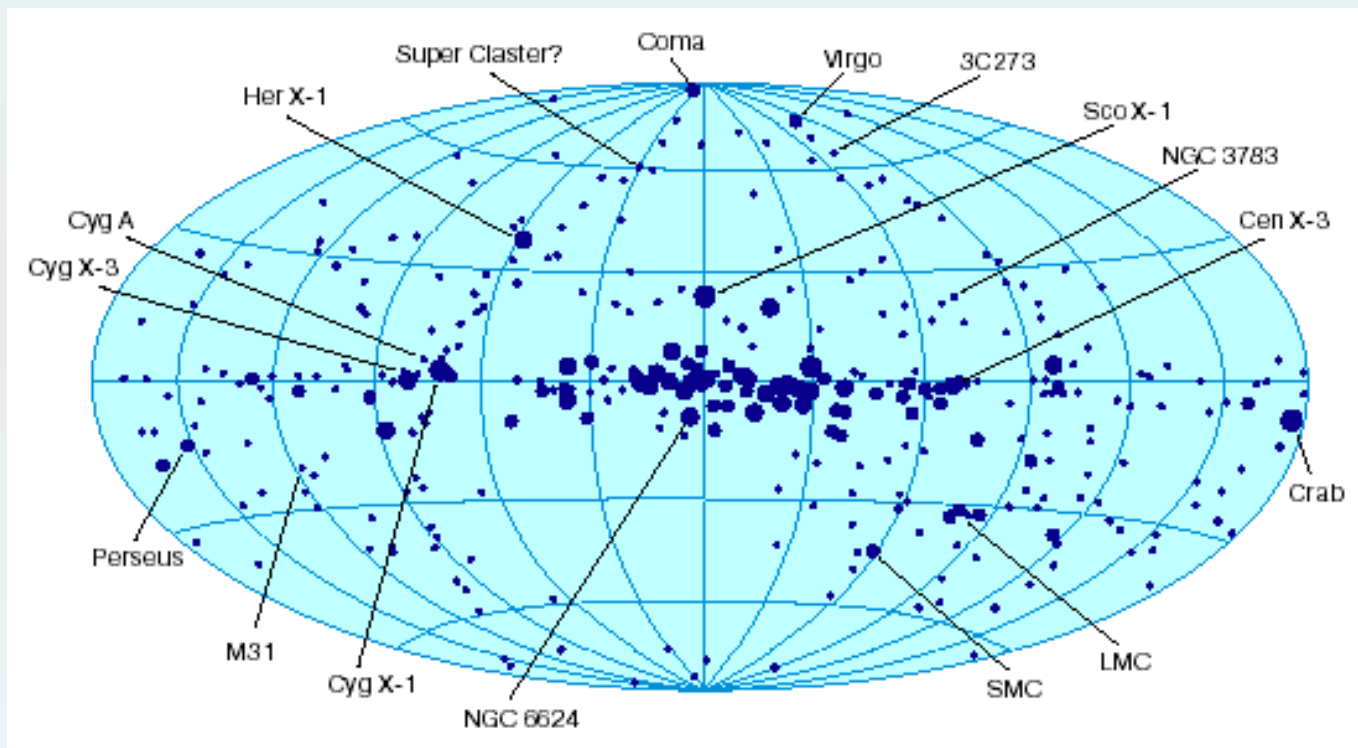


***Рентгеновское излучение
звезд и механизмы его
формирования***

Санкт-Петербург - 2007

Рентгеновское излучение звезд и механизмы его формирования



О чем будет лекция:

1. Введение
2. История открытия + основные инструменты рентгеновской астрономии
3. Механизмы генерации излучения в рентгеновской области спектра + излучающая плазма
4. Характеристики рентгеновского излучения звезд
5. Что ожидается?

1. Введение

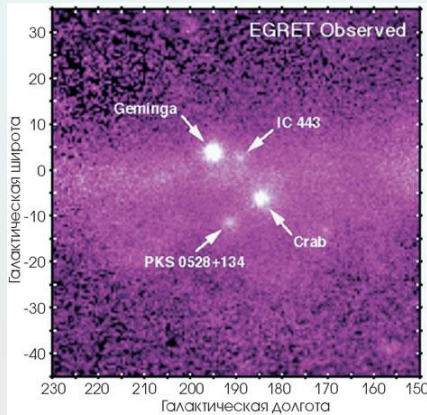
Рентгеновское излучение

$$E = 0.1 - 100 \text{ кэВ}$$

$$\lambda = 100 - 0.1 \text{ \AA}$$

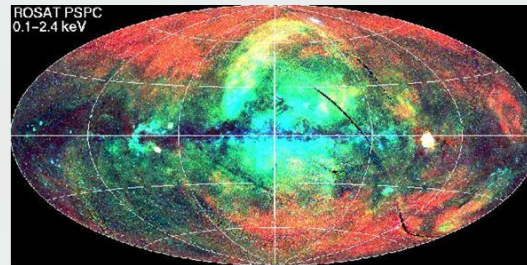
$E = 20 - 100 \text{ кэВ}$ – жесткий

$E = 1 - 20 \text{ кэВ}$ – классический

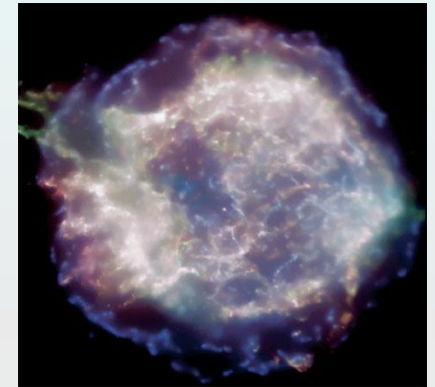


Изображение со спутника EGRET центра Галактики

$E = 0.1 - 1 \text{ кэВ}$ – мягкий



Изображение Галактики со спутника ROSAT



Изображение Cas A, полученное спутником Chandra

Единицы измерения потока !

Необходимо учитывать при обработке спектров!

В оптике: эрг/(см² * с * Гц), в рентгене: фот/(см² * с * кэВ)

$$F_x = A * F / (h^2 * \nu), \text{ где } A = 1.602 * 10^{-19} \text{ эрг/кэВ}$$

2. История открытия рентгеновской астрономии

1940 г. - первые эксперименты в США, Герберт Фридман.

1949 г. - новые счетчики на ракетах «Фау-2»

Солнце испускает рентгеновские фотоны!

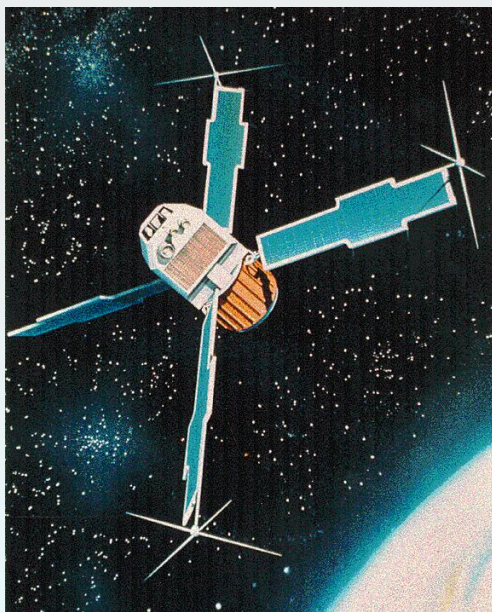
1964 г. - рентгеновское излучение

Крабовидной туманности

1962 г. - Скорпион X-1 - первый
рентгеновский источник, Джаакони



Крабовидная туманность, спутник Chandra



Изображение спутника UHURU

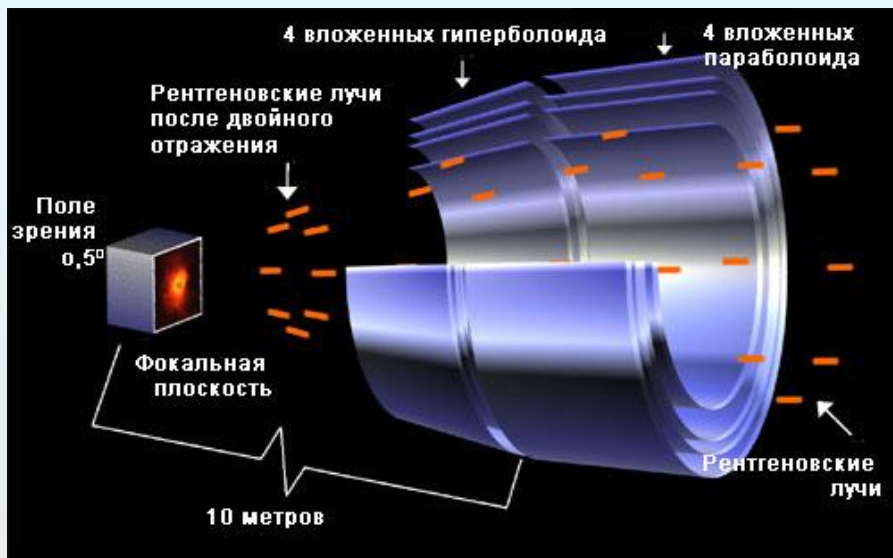
1966 г. – известно более 30 источников

12 декабря 1970 г. – запуск Uhuru

более 2,5 лет, 339 рент.источников, в том числе объект в созвездии Лебедя.

Но! Uhuru регистрировал только отдельные точечные источники.

1960 г. – первая публикация схемы рентг.телескопа, Джаакони и Росси.



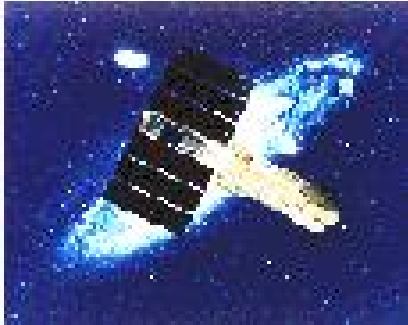
Из-за большой энергии рентг. кванты поглощаются при Любых углах падения, кроме самых «пологих», поэтому входящие лучи должны идти почти параллельно отражающей поверхности!

13 ноября 1978 г. – запуск первой обсерватории «Эйнштейн». Разрешающая способность порядка 5 угл.сек, регистрировал кванты в диапазоне 200эВ – 20 кэВ, остатки сверхновых, слабые внегалактические источники.

(www.elementy.ru/lib/430131/430137)

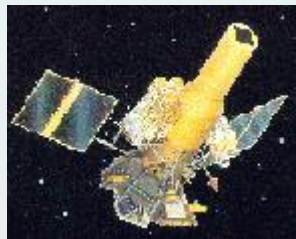


1980-90 г.г. – запуск множества спутников, среди них:



ASCA

GRANAT



HEAO3

ROSAT



EXOSAT



SAS3

HEAO1



(<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs>)

23 июля 1998 г. – запуск спутника Chandra,
разрешение до 0.5 угл.сек!



Рентгеновское излучение обнаружено у Солнца, звезд, остатков сверхновых, галактик, квазаров. Открыты новые классы объектов: двойные рентгеновские источники, барстеры, транзиенты, горячий межгалактический газ и т.д.

(www.elementy.ru/lib/430131/430137)

3. Механизмы рентгеновского излучения

Процессы, приводящие к появлению рентг.излучения:

тепловые

излучение нагретой до
высокой температуры
плазмы

з-н смещения Вина:

$$T\lambda \approx 0.29 \cdot 10^8 \Rightarrow$$

$$T \sim 10^6 - 10^7 \text{ К}$$

тормозное излучение

максвел. распределение
электронов

нетепловые

заряженные частицы
ускоряются каким-либо
механизмом

напр., при перезамыкании
силовых линий магн.поля в
солн.вспышках

степенное распределение
электронов

а. Тормозное излучение

Излучат. способность:

$$E_{cc} = (5,44 \cdot 10^{-39} \cdot g_{cc} Z^2 n_e n^+ / T^{1/2}) \cdot \exp(-h\nu/kT)$$

экспоненциальный множитель определяет завал по частоте

б. Рент.излучение в линиях

1. рент.линия нейтрального железа на энергии 6.4 кэВ - флуоресцентная.
2. рент.линии водородоподобного железа FeXXVI на эн. 6.97 кэВ и гелиеподобного железа FeXXV на эн. 6.7 кэВ, излучаются горячей плазмой.

H-like K_α : $1s - 2p$ ($^1P_{1/2}$) и $1s - 2p$ ($^1P_{3/2}$) ~ 20 кэВ

He-like $K\alpha$: $1s^2 - 1s2p$ (1P_1)

с. Магнито - тормозной механизм

Если $kT \ll mc^2$, то излучение циклотронное на частоте $\nu = eH/2\pi mc \approx 3 \cdot 10^6 \cdot H$ Гц и ее гармониках.

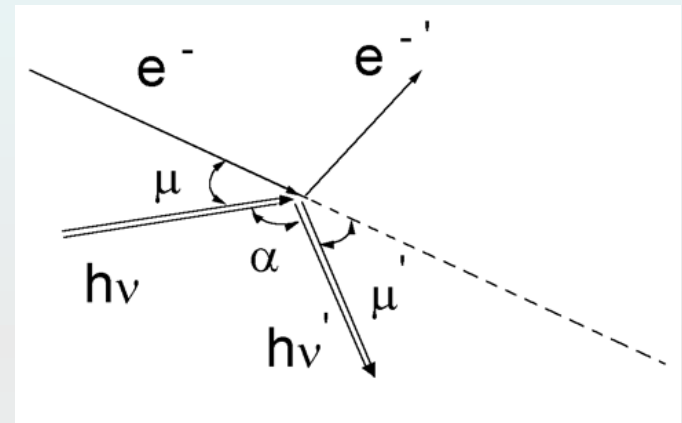
При $H \sim 10^{12} - 10^{14}$ Гс (нейтронные звезды в рент. пульсарах), циклотр. излучение попадает в рент. обл. спектра
При $H \sim 10^7 - 10^8$ Гс (бел.краслики в полярах), в опт. и ИК.

Если $E = \gamma mc^2$, $\gamma > 1$, то синхротр. излучение. Максимум его излучения приходится на частоту $\nu = eH\gamma^2 / 2\pi mc \approx 1.4 \cdot 10^6 \cdot H \cdot \gamma^2$ Гц

d. Комptonовское рассеяние фотонов на электронах

энергия электронов меньше энергии рентг. фотонов
(прямой эффект Комптона):
в нерелят. пределе ($h\nu \ll mc^2$)
 $\Delta\nu/\nu = -(h\nu/mc^2)(1 - \cos\alpha)$

энергия электронов больше
энергии фотонов
(обратный эффект Комптона):
 $\Delta\nu/\nu = 4(\gamma^2 - 1)/3$



если максв.распр. по скоростям, то
в нерелят. пределе $\gamma^2 - 1 \approx 3n$,
в релят. пределе $\gamma^2 - 1 \approx 12n^2$, где $n = kT/mc^2$

Излучающая плазма:

1. Тепловое излучение

оптически тонкая плазма

плоский спектр с
экспоненциальным завалом

Решение УПИ в однородном
плоском слое без рассеяния:

$$I_{\nu} = (1 - \exp(-\tau_{\nu})) B_{\nu} \approx \tau_{\nu} B_{\nu}$$

Короны звезд и Солнца,
остатки вспышек сверхновых,
скопления галактик, короны
эллиптических галактик

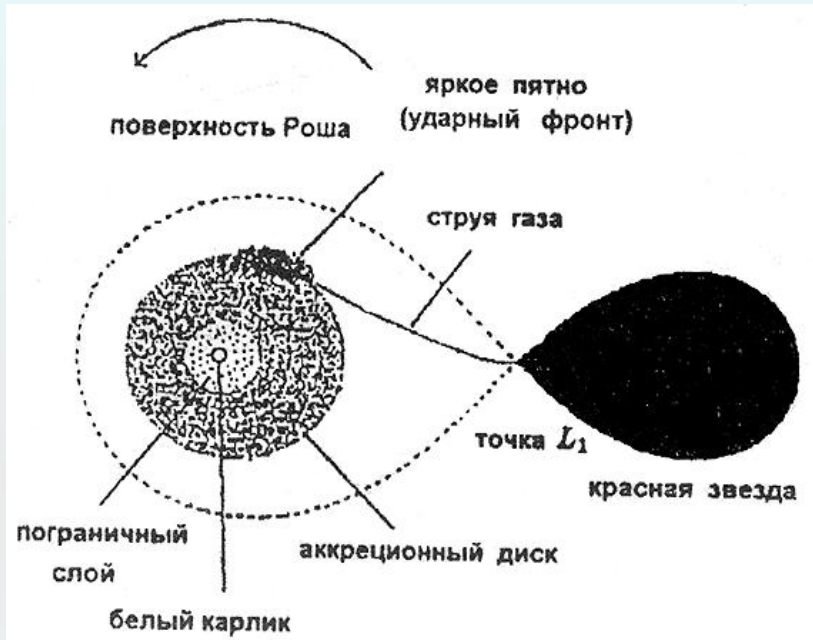
оптически толстая плазма

излучает как АЧТ

$I_{\nu} = B_{\nu}$ (пренебрегая рассеянием
на электронах)

Аккреция вещества на
компактный объект -
нейтронную звезду или
черную дыру в двойной
системе

Аккреция вещества массой ΔM на компактный объект массой M :



потенц.грав.эн. \Rightarrow в кинетич. \Rightarrow
излучается тепловая

количество излучаемой энергии:
 $\Delta E = \Delta M V^2 / 2 = GM \Delta M / 2R$,
где R - радиус нейтронной звезды

$$dM/dt = \text{const} \Rightarrow L = GMM^{\dot{}} / 2R$$

При $dM/dt \sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ на нейтронную звезду обеспечивает
светимость $\sim 8 \cdot 10^{37}$ эрг/с $\Rightarrow \sigma T^4 = L / 4\pi R^2 \Rightarrow T \sim 3 \cdot 10^7$ К \Rightarrow
рентген!

2. Нетепловое излучение

Зар.частицы приобретают большие энергии вследствие ускорения в электромагнитных полях и во время различных взрывных процессов.

Галактические космические лучи и солнечные косм.лучи - степенное распределение по энергиям.

Но! Тепловая плазма благодаря эффекту Комптона способна генерировать степенной спектр!

Что делать?

Наблюдать поляризацию!

Синхротр. изл.: $P=20-30\%$, при рассеянии на электронах: $P<12\%$.

4. Характеристики рентгеновского излучения звезд

(В.Ф.Сулейманов «Рентгеновская астрономия»,
Ю.Н.Гнедин «Небо в рентгеновских и гамма-лучах»,
R.Giacconi, H.Gutsky «X-ray Astronomy»)

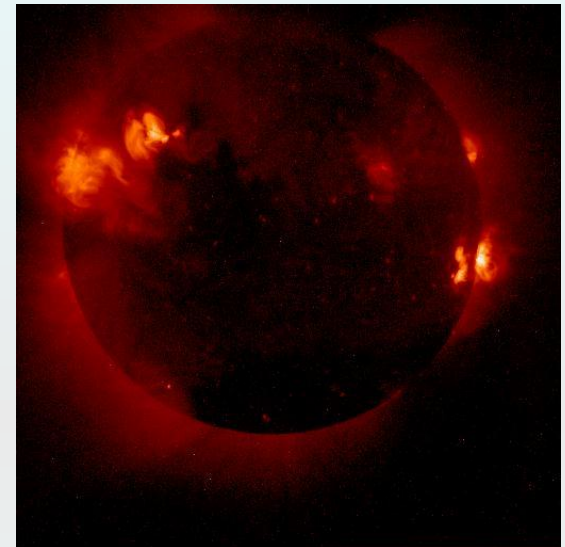
1. Солнце

корона и хромосферные вспышки
различные структуры - взаимодейд.
магн.поля с ионизов.газом в
солнечной короне

механизм возб. рент. изл-я:
тепловой(линейчатая компонента
спектра) + тормозной

$L_x \sim 10^{-6} - 10^{-7} L_s$, ($L_s = 3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с)

Изображение Солнца, спутник Yohkoh



2. Остатки сверхновых и нейтр.звезды в ост.сверхновых

горячая плазма за фронтом ударной волны, которая служит
границей раздела между межзвездной средой и
расширяющейся газовой оболочкой
искл. - Крабовидная тум-ть(синхротронное излучение)

3. Рентгеновские тесные двойные системы

почти все являются рентгеновскими пульсарами

ист.энергии - аккреция

необходимо! Сильное магн.поле на поверхности нейтронной звезды с индукцией $B \approx 10^{11} - 10^{13}$ Гс.



Газ свободно падает на нейтр. звезду до альвеновского радиуса:
 $B^2(r_A)/8\pi = 0.5\rho V^2(r_A)$.

На расстоянии r_A от нейтр. звезды м.п. останавливает поток плазмы и направляет его вдоль магнитных силовых линий на магн.полюсы звезды.

4. Затменно-двойные звезды

вещество ветра формирует ударный фронт при столкновении со второй звездой

темп. за фронтом уд-й волны $\sim 10^6$ К \Rightarrow изл-т в рентгене

Алголь: $L_x \sim 10^{30} - 10^{31}$ эрг/с

5. Транзиентные рент. источники или рентгеновские новые

рент. звезда, внезапно вспыхивающая в каком-либо участке неба, где она раньше не наблюдалась,

$t \sim$ недели, далее блеск падает в течении неск. месяцев

объяснение: это двойные системы, нейтр. звезда движ. по очень вытянутой орбите, при приближении к нормальной компоненте растет темп аккреции \Rightarrow наблюдается всплеск рент. потока.

$L_x \sim 10^{38}$ эрг/с

6. Барстеры

внезапные возрастания рентгеновской светимости за время порядка неск. секунд или меньше

Вещество, накапливаясь на поверхности нейтронной звезды, достигая критической массы, испытывает т/я взрыв, в процессе которого богатое водородом вещество превращается в гелий и др. тяж. элементы. Это ведет к вспышкам рент.излучения, повторяющимся каждые 4-12 сек.

Вспышки с интервалом от 20 до 400 сек. связаны с неуст. аккр.диска.

$L_x \sim 10^{38}$ эрг/с

7. Сверхмягкие рентгеновские источники (SSS)

мягкие спектры ($E \leq 0.5$ кэВ) + высокие светимости $L_x \sim 10^{38}$

интерпретация: тесные двойные системы с белым карликом и вторичной звездой спектрального класса F, переполняющей полость Роша.

ист-к рентгена - белый карлик

8. Черные дыры в двойных системах

выдающееся достижение рентгеновской астрономии - открытие кандидатов в черные дыры в двойных системах!!!

аккреция плазмы с поверхности опт.компонента на черн.дыру рент.изл-е никогда не будет пульсировать.

решающий момент - определение массы компактного объекта, напр., по кривой лучевых скоростей (А.М. Черепашук «Черные дыры в двойных звездных системах»)

Лебедь X-1 - самый мощный ист-к рент.излучения
нижняя граница массы невидимого аргумента: $M_x \geq 10M_s$

рент. источник в Большом Магеллановом облаке (LMC X-3) и рент. новая V404 Лебеда (V404 Gyg).

$M > 3M_s \Rightarrow$ с большой вероятностью явл. черными дырами

5. Что ожидается?

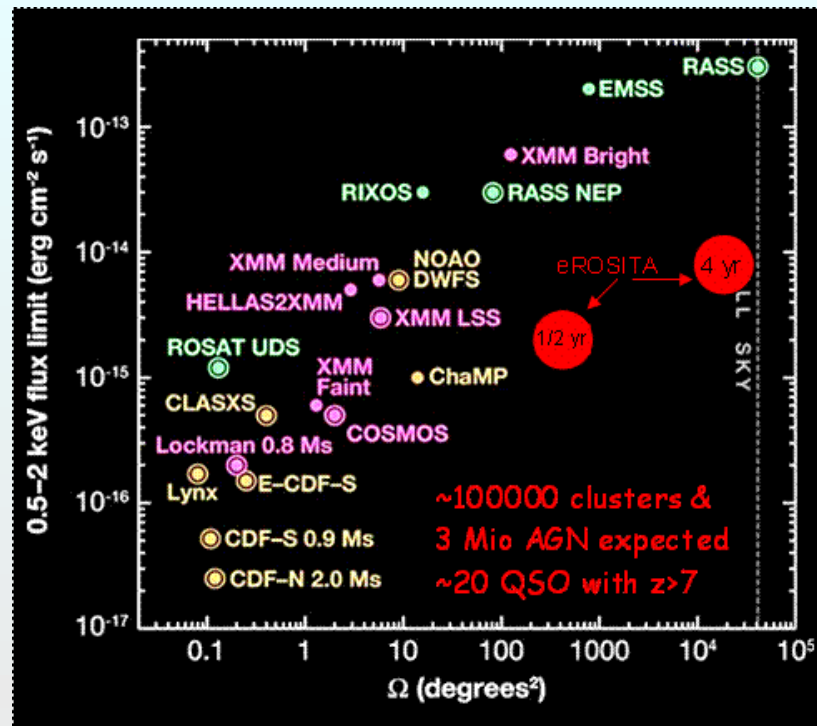
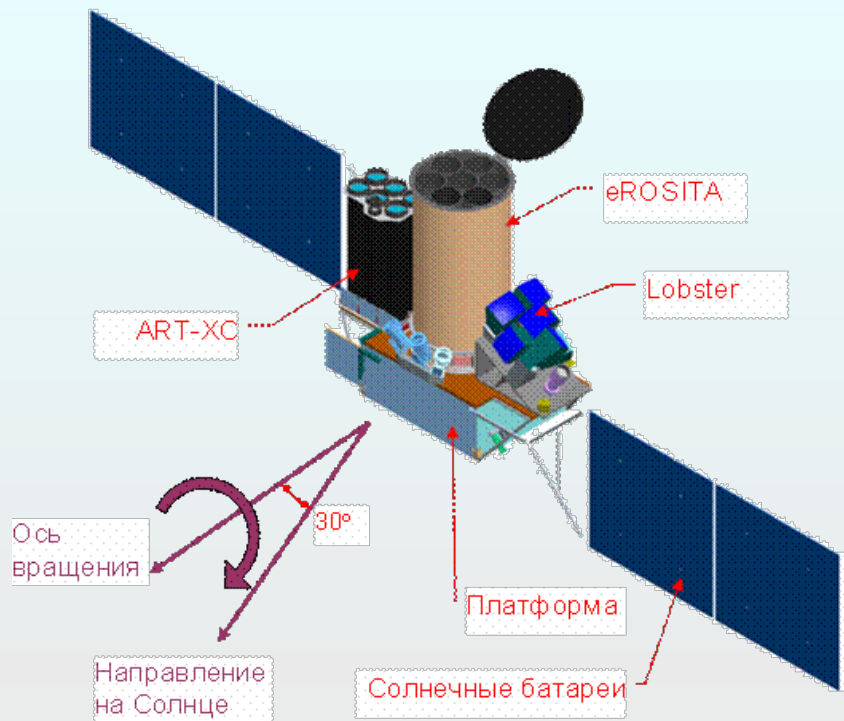
2011 г. - запуск СРГ !

Будет изучать самые энергичные процессы во Вселенной со времени Большого Взрыва!

Обзор неба в жестком рентгене от 2 до 30 кэВ.

Основные научные задачи проекта:

- Обнаружение около 100 тысяч скоплений галактик (т.е. регистрация всех существующих во Вселенной скоплений!);
- Обнаружение около 3 млн AGN и детальное исследование всей популяции сверхмассивных черных дыр;
- Детектирование волокон теплого газа между скоплениями для исследования процессов формирования крупномасштабной структуры Вселенной ;
- Детальное изучение физики популяции галактических рент.ист-в: рент.двойных, ост.вспышек сверх-х, протозвезды и др.



«СРГ впервые сделает полный обзор всего неба с рекордной чувствительностью, угловым и энергетическим разрешением в жестком диапазоне энергий. Обзор подобного качества и полноты позволяет решать самые амбициозные проблемы современной космологии», - **М.Н. Павлинский**, д.ф.-м.н., зам. директора Института космических исследований (ИКИ) РАН.

Список использованной литературы:

1. В.Ф.Сулейманов «Рентгеновская астрономия»
2. Ю.Н.Гнедин «Небо в рентгеновских и гамма-лучах»
3. R.Giacconi, H.Gutsky «X-ray Astronomy»
4. А.М. Черепашук «Черные дыры в двойных звездных системах»

Список использованный сайтов:

1. www.elementy.ru/lib/430131/430137
историческая часть вопроса
2. <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs>
рентгеновские телескопы и спутники: технические характеристики + полученные данные
3. http://hea.iki.rssi.ru/SXG/PROJECT/main_rus.htm
информация об СРГ: задачи + устройство