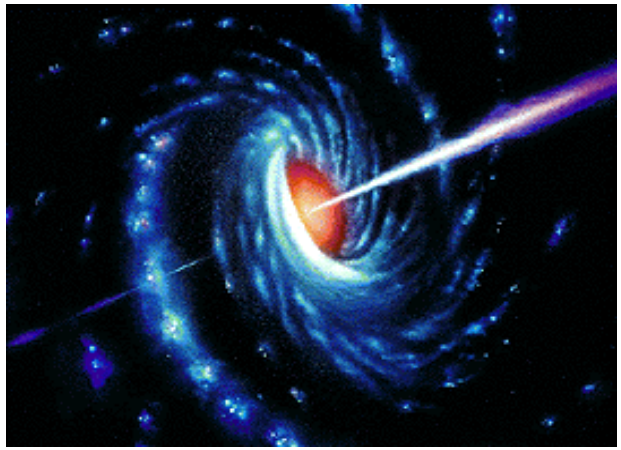
Procesy akrecyjne w astrofizyce

Plan wykładu:

1. Akrecja jako źródło energii
2. Wyznaczanie podstawowych parametrów obiektu
3. Zjawiska akrecji w astronomii
4. Opis akrecji sferycznej. Fale uderzeniowe
5. Ruch cząstki swobodnej o niezerowym momencie pędu w polu grawitacyjnym czarnej dziury
6. Opis klasycznej akrecji dyskowej
7. Transfer promieniowania przez materię
8. Zjawisko Comptona i dwufazowość akreującego ośrodka
9. Ewolucja czasowa dysków akrecyjnych, stacjonarność, stabilność.
10. Matematyczny opis zmienności (widmo mocy); teoria i obserwacje
11. Magnetohydrodynamika i formowanie dżetów
12. Zastosowania: akrecja na gwiazdy ciągu głównego i białe karły
13. Zastosowania: akrecja na gwiazdy neutronowe i "gwiazdowe" czarne dziury
14. Zastosowania: aktywne jądra galaktyk/kwazary

Cyg X-1 (u góry) i aktywne jądro galaktyki (u dołu) w oczach artysty



1. Cel wykładu

Pojęcie akrecji nie występuje w starszych polskich encyklopediach (np PWN z 1994 r.). I nic dziwnego, jest w astronomii pojęciem stosunkowo świeżym. Konieczność jego wprowadzenia pojawiła się w wyniku ***postępu technicznego*** w astronomii obserwacyjnej , jaki dokonał się w drugiej połowie XX wieku. Wyjście poza tradycyjną astronomię optyczną i rozpoczęcie obserwacji w zakresie radiowym, rentgenowskim i gamma ujawniło zupełnie nowe zjawiska, które wymagały nowych nazw.

AKRECJA [łac.], spadanie rozproszonej materii na powierzchnię gwiazdy lub czarnej dziury. Podczas akrecji energia mechaniczna opadającj materii zamienia się w ciepło, czemu towarzyszy emisja promieniowania elektromagnetycznego; w skrajnym przypadku akrecji do czarnej dziury wypromieniowywana energia może wynosić 0.4 mc^2, gdzie m - ilość spadającej masy, c- prędkość światła w próżni. W większości przypadków, a zwłaszcza w układach podwójnych, materia podlegająca akrecji ma znaczny moment pędu uniemożliwiający bezpośrednie opadnięcie na powierzchnię gwiazdy; etapem pośrednim jest utworzenie się wokółgwiezdnego obracającego się dysku, tzw. dysku akrecyjnego; dopiero utrata momentu pędu przez część cząstek w wyniku oddziaływań z materią dysku powoduje ich dalsze opadanie.

6-tomowa Nowa Encyklopedia Powszechna PWN

W innych słownikach (np. The Macmillan Dictionary of Astronomy, V. Illingwort, 1979) czasami nie jest dodawany wymóg działania wyłącznie pola grawitacyjnego. W słowniku angielsko-polskim ***accretion*** jest tłumaczone jako ***przyrost, zrośnięcie, narastanie.*** Wtedy do zjawisk akrecji można zaliczyć wzrost ziaren pyłu w kosmosie czy zlepianie się kamieni w fazie formowania się Układu Słonecznego.

1. Cel wykładu c.d.

Przytoczona definicja wydaje się dość abstrakcyjna, szczególnie bez konkretnych przykładów. Jakie znamy przykłady spadania w polu grawitacyjnym?

- deszcz (ale to raczej cyrkulacja...)
- meteoryty (np.słynny meteoryt tunguski, ewentualnie meteoryt, którego spadek spowodował wymarcie dinozaurów)
- spadek komety Shoemaker-Levi 9 na Jowisza latem 1994

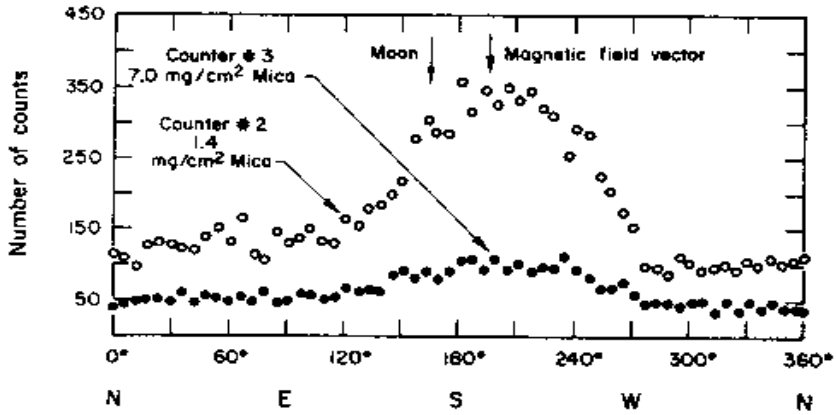
Te przykłady wypadają blado, jeśli chodzi o ich rolę w porównaniu do roli świecenia Słońca.

Są jednak w astronomii przykłady obiektów, których wygląd i zachowanie jest w decydujący sposób zdeterminowany przez akrecję.

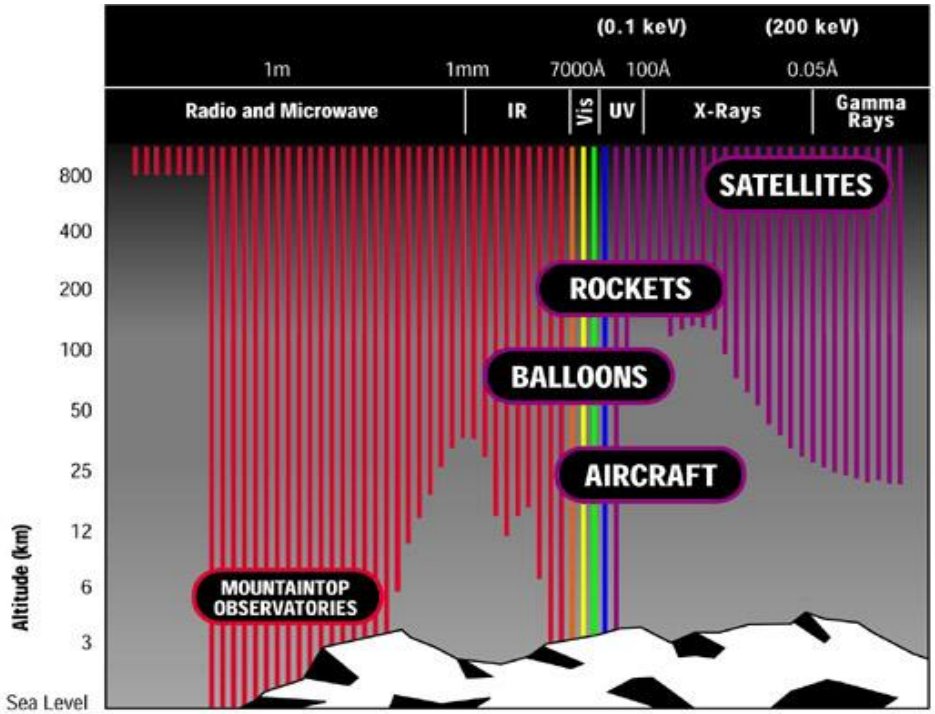
W przypadku gwiazd dotyczy to przede wszystkim gwiazd w ciasnych układach podwójnych, wymieniających masę. Przelewanie masy ma często charakter dramatyczny, z następującymi silnymi wybuchami. Procesowi towarzyszy silna emisja rentgenowska. Podobnie akrecją, ale na masywną czarną dziurę, tłumaczy się silną aktywność licznych aktywnych jąder galaktyk, w tym fenomen kwazarów. Nawet najmodniejsze obecnie, najjaśniejsze obiekty - błyski gamma - też prawdopodobnie w pewnej fazie są związane z procesem akrecji (na powstałą w wyniku hipernowej czrną dziurę; krótkie błyski mogą być z kolei zlewającymi się gwiazdami neutronowymi). Zatem niemal wszystkie najbardziej energetyczne, spektakularne zjawiska w astronomii wiąże się właśnie z procesem akrecji.

Na trop tych zjawisk naprowadziły nas obserwacje radiowe – odkrycie radiogalaktyk i kwazarów, ale zjawisko w caej jego krasie można można było zobaczyć dopiero po wysłaniu na orbitę satelitów rentgenowskich. Dlatego w 2002 r. Riccardo Giacconi został uhonorowany Nagrodą Nobla.

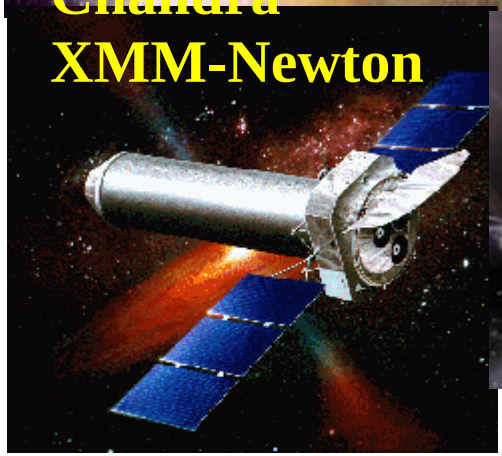
1. Cel wykładu c.d.



Riccardo Giacconi, jego obserwacja Sco X-1 i jego rakieta (Aerobee).



Chandra
XMM-Newton



Rossi-XTE
Constellation X

1. Cel wykładu cd.

Zjawiska akrecji pozornie nie są częste: zaledwie jedna na milion gwiazd w naszej Galaktyce jest zasadniczo w tej fazie. Jeśli jednak spojrzeć historycznie, to okaże się, że jedna na sto gwiazd wogóle przechodzi fazę znaczącej akrecji i to już jest zauważalne. Co więcej, jeśli popatrzeć na niebo "rentgenowskie", a nie "optyczne", to nasze wrażenie o ważności akrecji pogłębi się. Co prawda Słońce jest najjaśniejszym źródłem X na niebie, ale tylko ze względu na małą odległość. Inne "zwykłe" gwiazdy też widzimy tylko, gdy są bliskie, natomiast z dalekich odległości widzimy właśnie te, które akreują.
W katalogu ROSATA (satelita rentgenowski, dokonał przeglądu całego nieba):

- **gwiazdy 3-5 %**
- **AGN (active galactic nuclei - aktywne jądra galaktyk) 95%**

W przypadku galaktyk, to poziom ich aktywności wygląda następująco:

- znacząca aktywność - kilka %
- jasne galaktyki Seyferta - 10^{-3}
- radiogalaktyki - 10^{-5}
- Kwazary – 10^{-6}

Jest jednak niemal pewne, że wszystkie galaktyki na wczesnym etapie rozwoju przechodziły przez fazę "bycia kwazarem" czy choćby "bycia galaktyką Seyferta" i aktywność odgrywała rolę w procesie formowania się galaktyki jko całości. Obserwacje z HST wskazują na obecność czarnych dziur w stosunkowo słabo aktywnych galaktykach jak M87, istnieje też zaskakująco uniwersalny związek pomiędzy masą czarnej dziury a masą zgrubienia centralnego galaktyki macierzystej, niemal niezależny od poziomu aktywności galaktyki. W naszej galaktyce (Mleczna Droga) też rezyduje czarna dziura o masie $2.6\times10^{6}\,M_{s}$. Wszystko wskazuje na to, że każda normalna galaktyka zawiera czarną dziurę i wykazuje pewną, choćby niewielką aktywność w wyniku akrecji materii.

1. Cel wykładu cd.

Zjawiska akrecji obserwujemy też w okolicach młodych, a często dopiero formujących się gwiazd. Może nie jest to zjawisko energetycznie imponujące, ale w procesie akrecji, z resztek materii protogwiazdowej formują się, jak sądzimy, planety. Jeśli więc chcemy zrozumieć, jak powstał Układ Słoneczny, czy planety w innych układach, a także ocenić, jak wiele układów planetranych istnieje i na jak wielu mogą być warunki, sprzyjające powstawaniu życia, to też musimy się zająć akrecją.

Podsumowując znaczenie akrecji:

- **ze względu na poszerzenie zakresu widmowego współczesna astronomia jest "zdominowana" procesami akrecji**
- **bez zrozumienia tych procesów nie można odtworzyć ewolucji znacznej części gwiazd**
- **bez zrozumienia tych procesów nie uda się najprawdopodobniej zrozumieć w pełni powstawania galaktyk**
- **proces akrecji jest też kluczowym etapem powstawania Układu Słonecznego i ewentualnie innych układów planetarnych**

Z kolei zrozumienie przebiegu akrecji nie jest możliwe bez głębokiej znajomości fizyki, z czym mamy jeszcze ogromne kłopoty, a postęp jest dośc powolny. Na szczęście do wysiłku mobilizuje niesłychany strumień coraz lepszych danych obserwacyjnych w bardzo szerokim zakresie widmowym.

Zatem próba zrozumienia procesów akrecji jest zarazem bardzo dobrym pretekstem do wycieczki krajoznawczej po wielu dziedzinach fizyki.

Taki podwójny cel przyświeca mojemu wykładowi: zapoznanie Państwa z obiektami akreującymi i zobaczenie, jak sprawdza się Państwa znajomość fizyki w sytuacji, gdy trzeba jej użyć.

2. Źródła energii

Świecenie wymaga dostarczania energii. Jeśli obserwacje sugerują, że mamy do czynienia z silnymi źródłami promieniowania, to pierwszym i najbardziej podstawowym pytaniem jest to, skąd źródło czerpie swoją energię.

Najogólniej, źródła energi różnią się przede wszystkim wydajnością i dostępnością. Wydajność źródła energii można określać podając, ile energii można uzyskać z jednostki masy 'paliwa'. Jest to wielkość wymiarowa. Ale dla silnych źródeł energii wygodniejsza jest wielkość bezwymiarowa, określona z zasady równoważności Einsteina ($E = mc^2$)

$$\eta = \frac{\Delta E}{mc^2}$$

Źródła energii dzielą się na chemiczne, jądrowe i grawitacyjne. Ich własności można w prosty sposób oszacować.

Chemiczne źródła energii

Chemiczne źródła energii polegają na wchodzeniu różnych substancji w reakcje chemiczne, którym (czasami) towarzyszy wydzielanie energii. Typowy przykład to spalanie (gwałtowne utlenianie). Atomy łączą się za pośrednictwem swoich powłok elektronowych.
Wydajność takich procesów to stosunek energii wiązania elektronów w cząsteczkach do masy paliwa x c2. Proste oszacowanie, czego można się spodziewać, na podstawe atomu wodoru.
Zjawisko jest z natury rzeczy kwantowe, o czym przypomina obecność stałej Plancka we wzorze na energię poziomu podstawowego atomu wodoru

$$E_i = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2}$$ który wynika z mnemotechnicznego przepisu $$\frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \qquad m_e v r = n\hbar \qquad n = 1$$

2. Źródła energii c.d.

Energia jonizacji atomu wodoru - 13.6 eV
Energia spoczynkowa protonu - 511 keV×1836 = 0.94GeV Wydajność - 1.4×10^{-8}
Oczywiście nie każda reakcja jest źródłem energii i dobrych paliw trzeba szukać. Dokładne wartości wydajności nie są wyliczane z mechaniki kwantowej, ale doświadczalnie:

nazwa	*ciepło spalania*	*wydajność*
gaz świetlny	5400 kcal/kg	2.5×10^{-10}
węgiel czysty	8730 kcal/kg	4.1×10^{-10}
nafta	11520 kcal/kg	5.3×10^{-10}
wodór	33990 kcal/kg	1.6×10^{-9}

DYGRESJA: jednostki energii, ciepła itp.
w układzie SI : 1 J ; w cgs: 1 erg = 10^{-7} J; 1 keV = 1.602177×10^{-9} erg; 1 cal = 4.184 J
Zombeck, "Handbook of Astrophysics", Internet Edition

Jądrowe źródła energii
Spalanie wodoru to reakcja prowadząca do syntezy helu. Symbolicznie $4p \rightarrow {}^{4}He$
Wydajność jest określona przez energię wiązania cząstek w oddziaływaniach silnych. Co do rzędu wielkości, to jest ona porównywalna do energia spoczynkowa elektronu (1 MeV). Dokładniej

proces	*zysk energii/nukleon*	*wydajność*
spalanie wodoru na hel	7.1 MeV	0.0075
spalanie helu na żelazo	1.5 MeV	0.0016

2. Źródła energii cd

Spalanie wodoru zachodzi na przykład we wnętrzy Słońca. Oczywiście reakcja zachodzi nie tak, jak symbolicznie zapisana wcześniej. Podstawowy cykl w mniej masywnych gwiazdach to tzw. cykl pp (proton-proton), który zachodzi etapami

$^{1}H + {}^{1}H \longrightarrow {}^{2}D + e^{+} + \nu_{e}$ 7.9×10^{9} lat

$^{2}D + {}^{1}H \longrightarrow {}^{3}He + \gamma$ 1.3 s

$^{3}He + {}^{3}He \longrightarrow {}^{4}He + 2\,{}^{1}H$ 2.4×10^{5} lat

W gwiazdach masywniejszych wydajniejszy jest tzw. cykl CNO, w którym pierwiastki C, N i O działają jak katalizatory. Zużywanie cięższych pierwiastków po wyczerpaniu wodoru, w masywnych gwiazdach

Grawitacyjne źródła energii

Energia potencjalna masy m, możliwa do wyświecenia przy spadku do promienia R na ciało o masie M z nieskończoności $\frac{GMm}{R}$

Wydajność $\eta = \frac{GMm}{Rmc^2} = \frac{GM}{Rc^2}$

Zatem wygodnie jest wprowadzić wielkość, która od razu charakteryzuje potencjalne możliwości obiektu uzyskiwania energii z akrecji. Jest to wielkość

$R_{Schw} = \frac{2GM}{c^2}$ a liczbowo: $R_{Schw} = 2.95 \times 10^{5} \times \frac{M}{M_s}$ $[cm]$ Zatem: $\eta = 0.5 \frac{R_{Schw}}{R}$

Wielkośc ta to **promień Schwarzschilda.**

Jest to promień nierotującej czarnej dziury w ogólnej teorii względności. **Zatem wydajność procesu akrecji przy radialnym spadku z kompletnym wyhamowaniem.jest równa połowie stosunku wartości promienia Schwarzschilda obiektu do promienia powierzchni obiektu.**

2. Źródła energii cd

Wartości liczbowe:

obiekt	*masa*	*promień*	*R/RSchw*	*wydajność*
Księżyc	0.0123 M_Z	0.2725 R_Z	1.6×10^{10}	3.1×10^{-11}
Ziemia	5.976×10^{24} kg	6378 km	7.2×10^{8}	7.0×10^{-10}
Jowisz	317.893 M_Z	11.27 R_Z	2.6×10^{7}	2.0×10^{-8}
Słońce	1.989×10^{30} kg	696 000 km	2.4×10^{5}	2.1×10^{-6}
Syriusz B*	1 M_s	1/30 R_s	7.9×10^{3}	6.5×10^{-5}
Cen X-1 &	0.6 - 1.8 M_s	~10 km	~3	0.15
Cyg X-1#	10 M_s		1	0.5 (?)
3C 273 #	5×10^{8} M_s		1	0.5 (?)

**biały karzeł*

&gwiazda nautronowa; jej optyczny towarzysz to gwiazda Krzemińskiego

#czarne dziury; ponieważ nie mają powierzchni, do nich te wzory nie dokładnie się stosują

Akrecja potrafi być procesem niezwykle wydajnym.