

Kısmî Kütle Aktarımı Aşamasındaki Disklerin Evrimi

Yavuz Ekşi

İstanbul Teknik Üniversitesi,
Fizik Müh. Böl.



9 Eylül 2016, XX. UAK - Atatürk Üniversitesi

- 1 Giriş
- 2 Alternatif/modifiye/genişletilmiş gravitasyon modellerinde nötron yıldızları
- 3 Radyo pulsarları
- 4 X-ışını pulsarları
- 5 İleri bakış

İstanbul Teknik Üniversitesi

- 1773: Mühendishane-i Bahr-i Hümayûn (İmparatorluk Deniz Mühendishanesi)
- 1795: Mühendishane-i Berr-i Hümayûn (İnşaat fakültesi)
- 1847: Mimarlık Fakültesi
- 1934: Makine/Elektrik Fakültesi
- 1982: Fen Edebiyat Fakültesi! Servis derslerinin verilmesi amacıyla...

İTÜ Gravitasyon, kozmoloji ve astrofizik çalışma grubu

- Doç. Dr. Özgür Akarsu
- Doç. Dr. Savaş Arapoğlu
- Prof. Dr. K. Yavuz Ekşi
- Doç. Dr. Emre Onur Kahya
- Dr. Nihan Katırcı
- Yard. Doç. Dr. Vakıf Kemal Önemli
- Prof. Dr. Neşe Özdemir
- Dr. Mehmet Özkan
- Dr. Sinem Şaşmaz Muş

Yüksek Enerji Astrofizik grubu



- Dr. Sinem Şaşmaz Muş (Doktora-sonrası)
- Can Güngör (Doktora)
- Murat Metehan Türkoğlu (Doktora)
- İ. Ceyhun Andaç (Doktora)
- Sercan Çıkıntoğlu (Doktora)
- Seda Işık (Doktora)
- Armin Motlagh Vahdat (Yüksek lisans)
- Hessam Farazi Majd (Yüksek lisans)
- Mehmet Deniz Aksulu (Yüksek lisans)
- Burak Cem Coşkun (lisans)
- Melih Kara (lisans)

Daha önce:

- Vildan Keleş-Tuğyanoğlu
- Abdullah Güneydaş
- Gökçe Özsükan

İşbirliği

- Sabancı Üniversitesi: Ali Alpar, Ünal Ertan, Ersin Göğüş
- İstanbul Üniversitesi: Tolga Güver, Erbil Gügercinolu
- Mimar Sinan Üniversitesi: Cemsinan Deliduman

Genişletilmiş gravitasyon modellerinde nötron yıldızları:

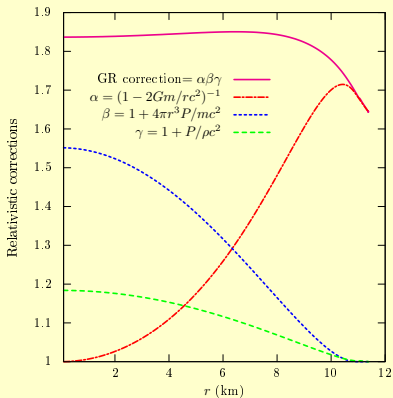
Alternatif/modifiye/genişletilmiş gravitasyon modellerinde
nötron yıldızlarının yapısı (TÜBİTAK 108T686):

- Arapoğlu, Deliduman, **Eksi** 2011, *Constraints on perturbative $f(R)$ gravity via neutron stars*, **JCAP 07, 020**
- Deliduman, **Eksi**, Keleş, 2012, *Neutron star solutions in perturbative quadratic gravity*, **JCAP 05, 036**
- **Eksi**, Güngör, Türkoğlu 2014, *What does a measurement of mass and/or radius of a neutron star constrain: Equation of state or gravity?* **Phys. Rev. D 89, 063003**
- Staykov, **Eksi** et al. 2016, *Moment of inertia of neutron star crust in alternative and modified theories of gravity*, **Phys. Rev. D 94, 024056**
- Arapoğlu, Çıkıntoğlu, **Eksi** 2016, *Relativistic Stars in Starobinsky gravity with matched asymptotic expansion*, *Phys. Rev. D değerlendirmede (arXiv:1604.02328)*
- **Eksi** 2016, *Neutron stars: compact objects with relativistic gravity*, **Turkish J. Phys. 40: 127–138** (derleme)

Nötron yıldızları rölativistik

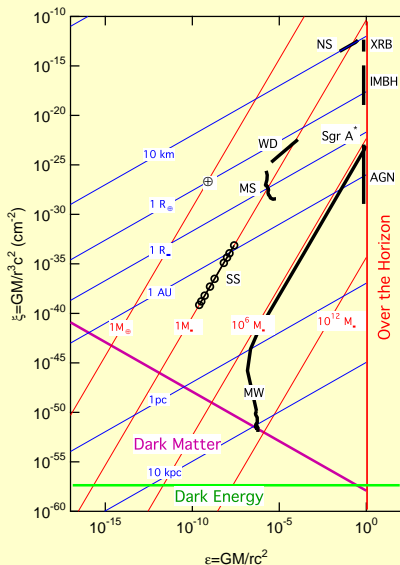
$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{mc^2}\right) \left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right)^{-1}$$

Tolman 1939, Oppenheimer & Volkoff 1939



Ekşi 2016, TJP

Yeğin gravitasyon nedir?



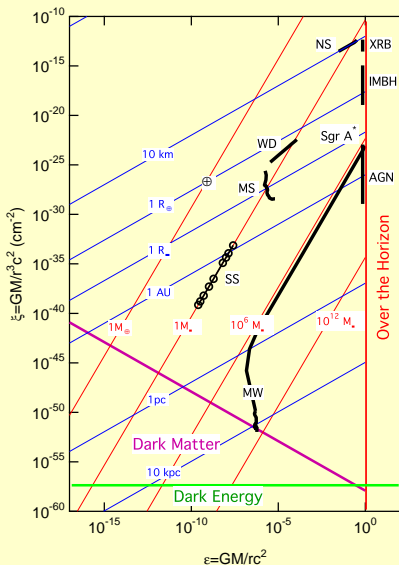
- Genel görelikte gravitasyon alanının yeğinliğinin ölçüsü

$$\epsilon \equiv \frac{GM}{rc^2} \quad \text{tıkızlık}$$

- Daha genel bir gravitasyon kuramında alanın yeğinliği için bir diğer ölçü eğrilik

$$\xi \equiv \frac{GM}{r^3 c^2} \quad \text{eğrilik}$$

Güneş sistemi testleri

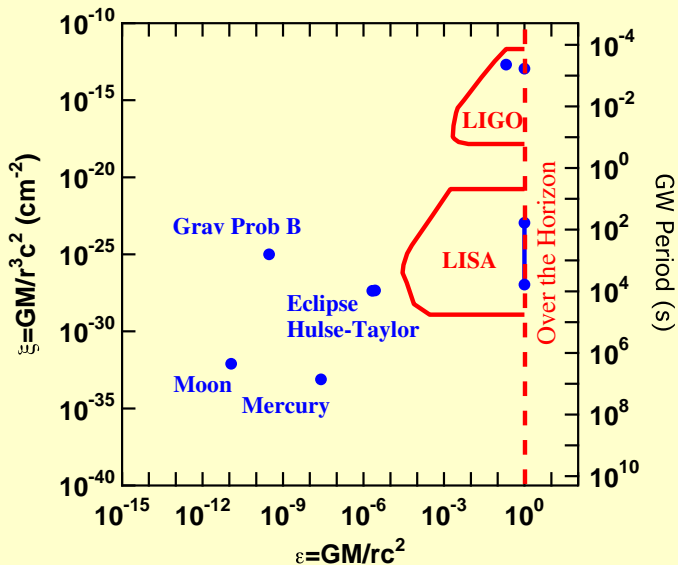


Genel göreliliğin tüm tarihsel testleri Güneş sisteminde yapıldı. Sondalayabilecekleri en yegün gravitasyon alanı Güneş'in yüzeyindeki alandır:

$$\epsilon_{\odot} \simeq \frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}c^2} \simeq 2 \times 10^{-6} \quad \text{tıklık ,}$$

$$\xi_{\odot} = \frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}^3 c^2} \simeq 4 \times 10^{-28} \text{ cm}^{-2} \quad \text{eğrilik}$$

Gravitasyon testleri



Nötron yıldızları

$M = 1.4M_{\odot}$ kütleli ve $R = 10$ km yarıçaplı bir nötron yıldızı ile yapılacak bir test

$$\epsilon \simeq \frac{GM}{Rc^2} \simeq 0.2 \sim 10^5 \epsilon_{\odot} ,$$

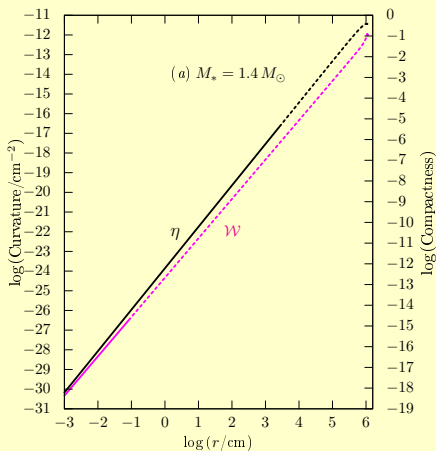
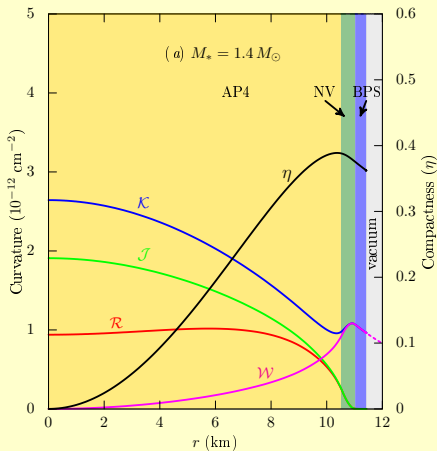
kadarlık tıkHzlık ve

$$\xi = \frac{GM}{R^3 c^2} \simeq 4 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \sim 10^{15} \xi_{\odot} .$$

kadarlık eğrilik sondalar.

Genel görelilik ve zayıf gravitasyonlarda benzer öndeyileri olan genelleştirmeleri arasındaki farklar tıkHzlık 5, eğrilik 15 merteye büyüdüğünde belirginleşebilir!

Nötron yıldızı içinde tıkalık ve eğrilik



Ekşi, Güngör, Türkoğlu (2014) Phys. Rev. D

Genel görelikten ne kadar sapabiliriz?

Nötron yıldızlarını
kullanarak

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R + \alpha R^2)$$

biçimindeki gravitasyon
modelinde α 'nın değerini
kısıtlayalım

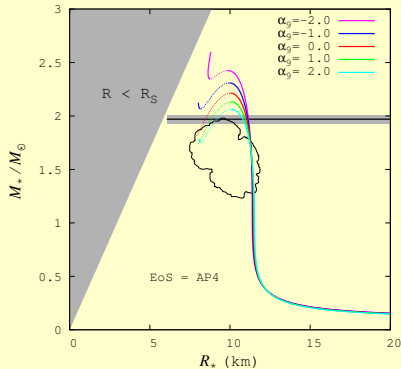
Genel görelikten ne kadar sapabiliriz?

Nötron yıldızlarını
kullanarak

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R + \alpha R^2)$$

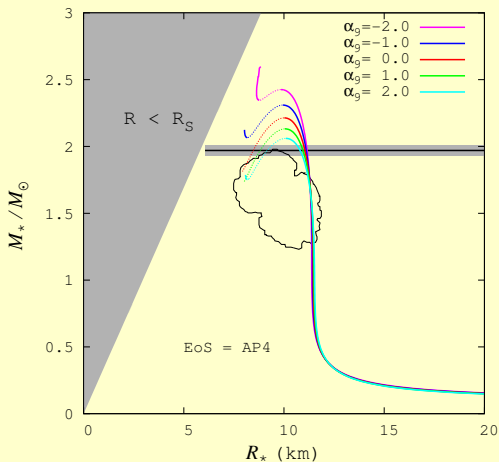
biçimindeki gravitasyon
modelinde α 'nın değerini
kısıtlayalım

Arapoğlu, Deliduman, Ekşi
(2011) JCAP



$$\alpha_g = \alpha / 10^9 \text{ cm}^2$$

$$f(R) = R + \alpha R^2$$



$$\alpha_g = \alpha / 10^9 \text{ cm}^2$$

- Çok sayıda hal denklemi için kütle yarıçap ilişkisini inceleyerek

$$|\alpha| < 10^{10} \text{ cm}^2$$

olduğunu gördük.

Arapoğlu, Deliduman, KYE (2011)

- Gravity Probe B verileri ise

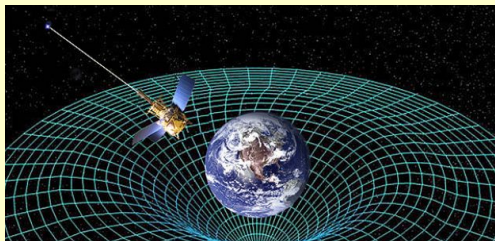
$$\alpha \lesssim 5 \times 10^{15} \text{ cm}^2$$

olduğunu söylüyor

(Näf & Jetzer 2010)

$$f(R) = R + \alpha R^2$$

- Çok sayıda hal denklemi için kütle yarıçap ilişkisini inceleyerek



$$|\alpha| < 10^{10} \text{ cm}^2$$

olduğunu gördük.

Arapoğlu, Deliduman,
KYE (2011)

- Gravity Probe B verileri ise

$$\alpha \lesssim 5 \times 10^{15} \text{ cm}^2$$

olduğunu söylüyor

(Näf & Jetzer 2010)

$$f(R) = R + \alpha R^2$$

- Çok sayıda hal denklemi için kütle yarıçap ilişkisini inceleyerek

$$|\alpha| < 10^{10} \text{ cm}^2$$

Hal denklemini bilmesek bile nötron yıldızları gravitasyonu kısıtlamak için en uygun nesnelere!

olduğunu gördük.
Arapoğlu, Deliduman,
KYE (2011)

- Gravity Probe B verileri ise

$$\alpha \lesssim 5 \times 10^{15} \text{ cm}^2$$

olduğunu söylüyor

(Näf & Jetzer 2010)

Genel görelikten ne kadar sapabiliriz?

Nötron yıldızlarını
kullanarak

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R + \beta R^{\mu\nu} R_{\mu\nu})$$

biçimindeki gravitasyon
modelinde β 'nin değerini
kısıtlayalım

Genel görelikten ne kadar sapabiliriz?

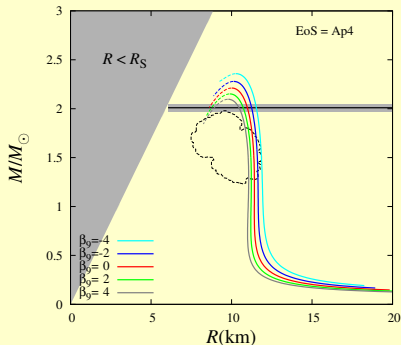
Nötron yıldızlarını
kullanarak

$$S = \frac{c^4}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R + \beta R^{\mu\nu} R_{\mu\nu})$$

biçimindeki gravitasyon
modelinde β 'nın değerini
kısıtlayalım

Deliduman, Ekşi, Keleş (2012)

JCAP



$$\beta_g = \beta / 10^9 \text{ cm}^2$$

Tekil pertürbasyon problemi olarak alternatif gravitasyon

- Einstein-Hilbert eylemine yeni terimler eklenmesi denklemlerin derecesini 4'e çıkarıyor.
- En yüksek dereceli terimin pertürbatif olması: tekil pertürbasyon problemi
- Benzer bir problem Euler denklemine viskoz terimin eklenmesi: sıfır vizkozite küçük vizkoziteden çok farklı.
- “Matched asymptotic expansion” yöntemi bu tür tekil pertürbasyonlar için uygun.
- $f(R) = R + \alpha R^2$ gravitasyonunda homojen yıldız çözümü: Arapoğlu, Çıkıntoğlu, Ekşi (2016) Phys. Rev. D
- $f(R) = R + \alpha R^2$ gravitasyonunda vakum çözümü: Çıkıntoğlu (2016) yayına hazırlanıyor.

Nötron yıldızı kabuğunun eylemsizlik momentini

- Pulsar sıçrama modelleri kabuk ile iç kısımlar arasında açısal momentum transferine dayanıyor.
- Yeni problem: Kabuğun eylemsizlik momentini bu iş için yeterli görünmüyor.
- Kabukta tıkalık ve eğrilik yüksek olduğuna göre fark alternatif/modifiye gravitasyon modelleri kullanarak kapatılabilir mi?
- Kapatılamaz: [Staykov, Ekşi et al. 2016 Phys. Rev. D](#)

Radyo pulsarları:

- **Eksi** 2016 *On the new braking index of PSR B0540-69: further support for magnetic field growth of neutron stars following submergence by fallback accretion*, MNRAS değerlendirmede [arXiv:1608.04308](#)
- **Eksi** et al. 2016 *The Inclination Angle and Evolution of the Braking Index of Pulsars with Plasma-filled Magnetosphere: Application to the High Braking Index of PSR J1640-4631*, [ApJ 823, 34](#)
- Özsükan, **Eksi** et al. 2014, *The Vela Pulsar with an Active Fallback Disk*, [ApJ 796, 46](#)
- Güneydaş, **Eksi** 2013, *Relating the kick velocities of young pulsars with magnetic field growth time-scales inferred from braking indices*, [MNRAS Lett. 430, 59](#)

Manyetik dipol yavaşlaması

Pulsarlar ışıdığı enerjiyi dönme kinetik enerjisinden sağlıyor:

$$L = -I\Omega\dot{\Omega}$$

Manyetik dipol ışıması

$$I\dot{\Omega} = -\frac{2\mu^2 \sin^2 \alpha}{3c^2}\Omega^3$$

Frenleme indisi:

$$n \equiv \frac{\Omega\ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2}$$

Manyetik dipol ışıması için $n = 3$ olması bekleniyor.

Braking index

Table : Frenleme indisi hassas ölçülmüş pulsarlar

| Pulsar | ν (Hz) | $\tau_c = -\frac{\nu}{2\dot{\nu}}$ (kyr) | $n = \frac{\nu\ddot{\nu}}{\dot{\nu}^2}$ |
|----------------|---------------|---|---|
| B0531+21(Crab) | 30.225 | 1.2399 | 2.51(1) |
| B0833-45(Vela) | 11.2(5) | 11.303 | 1.4(2) |
| J1833-1034 | 16.159 | 4.8535 | 1.8569(6) |
| B0540-69 | 19.738 | 1.6763 | 2.087(7) |
| J0537-6910 | 62.038 | 4.9743 | -1.5 |
| B1509-58 | 6.6115 | 1.5648 | 2.832(3) |
| J1846-0258 | 3.0743 | 0.72736 | 2.65(1) |
| J1119-6127 | 2.4512 | 1.6078 | 2.684(2) |
| J1734-3333 | 0.85518 | 81.280 | 0.9(2) |

Frenleme indislerinin 3'ten farkını açıklamak için öneriler:

- Rölativistik parçacık atımı (Manchester & Peterson 1989)
- Eylemsizlik momentinin değişimi (Ho & Andersson 2012)
- Noktasal dipol yaklaşımını gevşetmek (Melatos 1997)
- Süpernova kalıntısı disklerden pervane torkları (Menou et al. 2001)
- Manyetik momentin büyümesi (Blandford & Romani 1988)
 - Termo-elektriksel (Blandford, Applegate & Hernquist, 1983) ve thermo-manyetik (Urpin, Levshakov, Yakovlev 1986) süreçlerle büyüme
 - Süpernova kalıntısı maddenin göndüğü manyetik alanın yüzeye geri difüzyonu ile büyümesi (Muslimov & Page 1995, Geppert, Page & Zannias 1999).

Frenleme indislerinin 3'ten farkını açıklamak için öneriler:

- Rölativistik parçacık atımı (Manchester & Peterson 1989)
- Eylemsizlik momentinin değişimi (Ho & Andersson 2012)
- Noktasal dipol yaklaşımını gevşetmek (Melatos 1997)
- Süpernova kalıntısı disklerden pervane torkları (Menou et al. 2001)
- Manyetik momentin büyümesi (Blandford & Romani 1988)
 - Termo-elektriksel (Blandford, Applegate & Hernquist, 1983) ve thermo-manyetik (Urpin, Levshakov, Yakovlev 1986) süreçlerle büyüme
 - Süpernova kalıntısı maddenin göndüğü manyetik alanın yüzeye geri difüzyonu ile büyümesi (Muslimov & Page 1995, Geppert, Page & Zannias 1999).

Frenleme indislerinin 3'ten farkını açıklamak için öneriler:

- Rölativistik parçacık atımı (Manchester & Peterson 1989)
- Eylemsizlik momentinin değişimi (Ho & Andersson 2012)
- Noktasal dipol yaklaşımını gevşetmek (Melatos 1997)
- Süpernova kalıntısı disklerden pervane torkları (Menou et al. 2001)
- Manyetik momentin büyümesi (Blandford & Romani 1988)
 - Termo-elektriksel (Blandford, Applegate & Hernquist, 1983) ve thermo-manyetik (Urpin, Levshakov, Yakovlev 1986) süreçlerle büyüme
 - Süpernova kalıntısı maddenin göndüğü manyetik alanın yüzeye geri difüzyonu ile büyümesi (Muslimov & Page 1995, Geppert, Page & Zannias 1999).

Frenleme indislerinin 3'ten farkını açıklamak için öneriler:

- Rölativistik parçacık atımı (Manchester & Peterson 1989)
- Eylemsizlik momentinin değişimi (Ho & Andersson 2012)
- Noktasal dipol yaklaşımını gevşetmek (Melatos 1997)
- Süpernova kalıntısı disklerden pervane torkları (Menou et al. 2001)
- Manyetik momentin büyümesi (Blandford & Romani 1988)
 - Termo-elektriksel (Blandford, Applegate & Hernquist, 1983) ve thermo-manyetik (Urpin, Levshakov, Yakovlev 1986) süreçlerle büyüme
 - Süpernova kalıntısı maddenin göndüğü manyetik alanın yüzeye geri difüzyonu ile büyümesi (Muslimov & Page 1995, Geppert, Page & Zannias 1999).

Frenleme indislerinin 3'ten farkını açıklamak için öneriler:

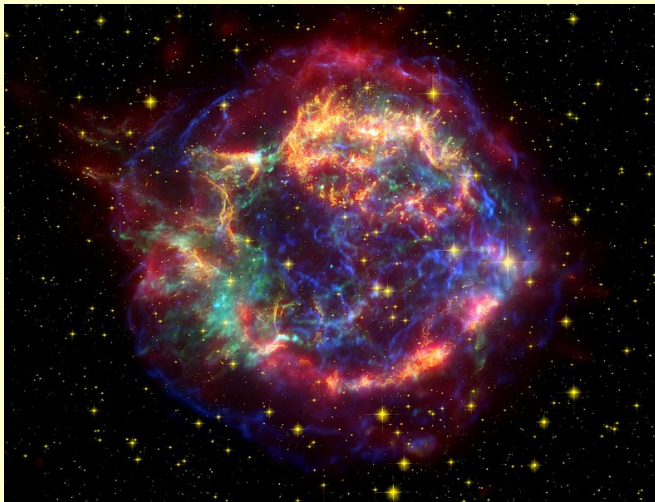
- Rölativistik parçacık atımı (Manchester & Peterson 1989)
- Eylemsizlik momentinin değişimi (Ho & Andersson 2012)
- Noktasal dipol yaklaşımını gevşetmek (Melatos 1997)
- Süpernova kalıntısı disklerden pervane torkları (Menou et al. 2001)
- Manyetik momentin büyümesi (Blandford & Romani 1988)
 - Termo-elektriksel (Blandford, Applegate & Hernquist, 1983) ve thermo-manyetik (Urpin, Levshakov, Yakovlev 1986) süreçlerle büyüme
 - Süpernova kalıntısı maddenin gömüdüğü manyetik alanın yüzeye geri difüzyonu ile büyümesi (Muslimov & Page 1995, Geppert, Page & Zannias 1999).

Süpernova 1987A



Merkezinde bir nötron yıldızı bulunamadı! Manyetik alan sonradan büyüyor olabilir (Michel 1994).

Cassiopeia A-Koltuk nebulası



Merkezinde bir nötron yıldızı var ama pulsar gibi davranmıyor!
Pulsar rüzgar nebulası da yok. Merkezî tıkız cisim!

Merkezî tıkız nesnelere

- Bir süpernova kalıntısıyla ilişkili ama pulsar değil.
- Peryotları 100-400 ms. Bazısı X-ışınlarında pulse gösteriyor.
- Manyetik alanları 10^{10} G, pulsarlara göre küçük.
- Sayıları 10 kadar ama bunları keşfetmek daha zor, dolayısıyla pulsarlardan bile yaygın olabilirler.
- SN 87A bir Merkezî Tıkız Nesne mi?

Manyetik alan “gömülme” senaryosu

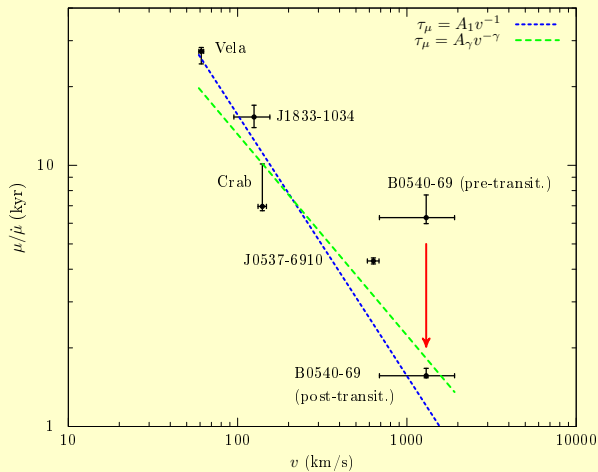
- Süpernova patlamasında bir miktar madde kurtulma hızına ulaşamayabilir.
- Bu madde nötron yıldızının üzerine düşerek yeni doğan nötron yıldızının manyetik alanını kabuğa gömebilir.
- Gömülen manyetik alan zamanla yüzeye difüze olur (Muslimov & Page 1995, Geppert, Page & Zannias 1999).
- Genç nötron yıldızlarının manyetik alanları hala büyümekte olabilir.
- Merkezî tıkız cisimler alanı hala gömülü nesnelere olabilir.

Modeli nasıl test edebiliriz?

- Nötron yıldızları doğum anında darbe alarak yüksek hızlara ulaşabilir ($v \sim 500$ km/s).
- Hızlı giden nötron yıldızları az madde yutar, manyetik alanı sığ gömülür, difüzyon süresi kısa olur.
- Difüzyon süresini frenleme indisinden bulabiliriz:

$$n = 3 + 2 \frac{\dot{\mu} \nu}{\mu \dot{\nu}}$$

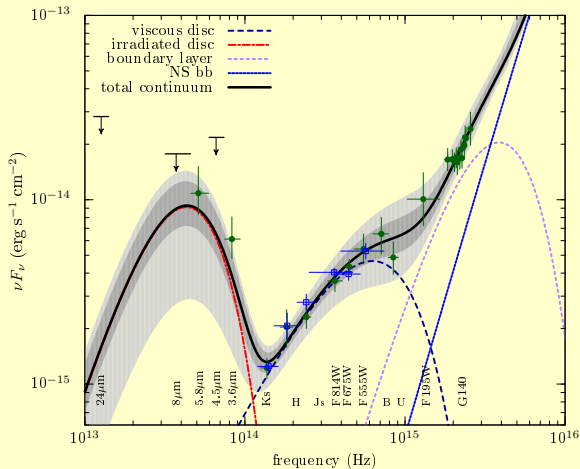
Hız- $\mu/\dot{\mu}$



Güneydaş & Ekşi (2013) MNRAS Lett.

Ekşi (2016) MNRAS gönderildi.

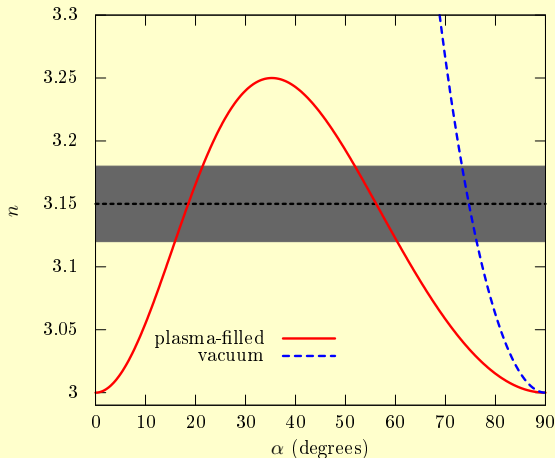
Süpernova kalıntısı diskler



Süpernova kalıntısı maddenin başlangıçtaki yeğin kütle aktarımından geriye kalan yüksek açısal momentumlu madde bir disk oluşturabilir. Pervane aşamasında “sessiz disk” [Sunyaev & Shakura \(1977\)](#) modeline uyar.

Özsükan, Ekşi et al. (2014) ApJ

Frenleme indisi 3'ten büyük pulsar: PSR J1640–4631 Archibald et al. (2016)

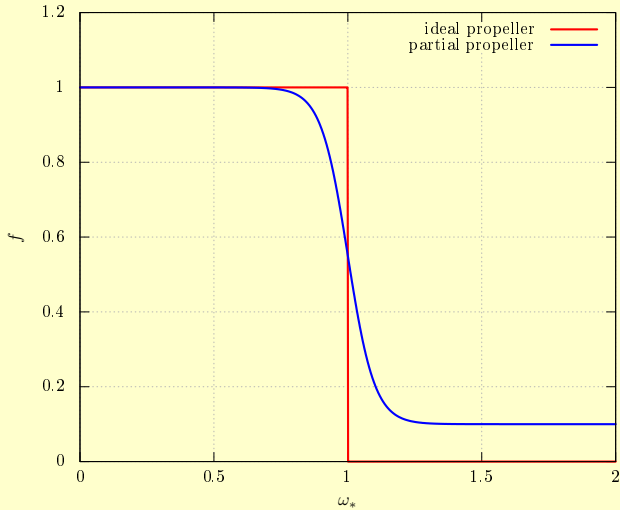


Manyetik dipol torkunun yavaşlatıcı bileşeninin yanı sıra dönme eksenini ile manyetik eksenini yaklaştıran bileşeni de var (Ekşi et al. (2016) ApJ).

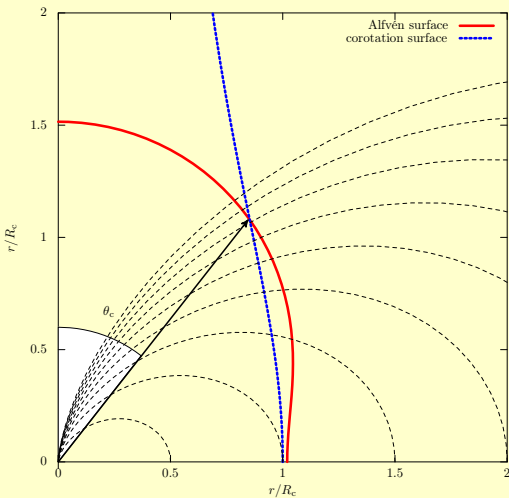
X-ışını pulsarları:

- Aşırı parlak X-ışını kaynakları (Ekşi et al. 2015 MNRAS lett)
- Aql X-1 parlamalarının sınıflandırılması (Güngör, Güver & Ekşi 2014, MNRAS)
- Pervane aşamasında kısmî kütle aktarımı (Ekşi & Kutlu 2011, Güngör, Güver, Göğüş, Ekşi 2016 MNRAS yayına hazırlanıyor)

Kısmi kütle aktarımı:

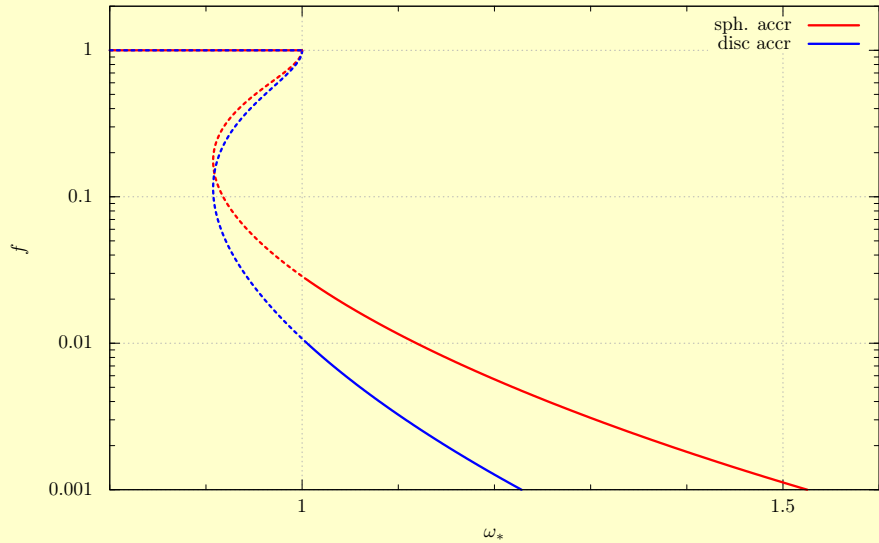


Kısmi kütle aktarımı:

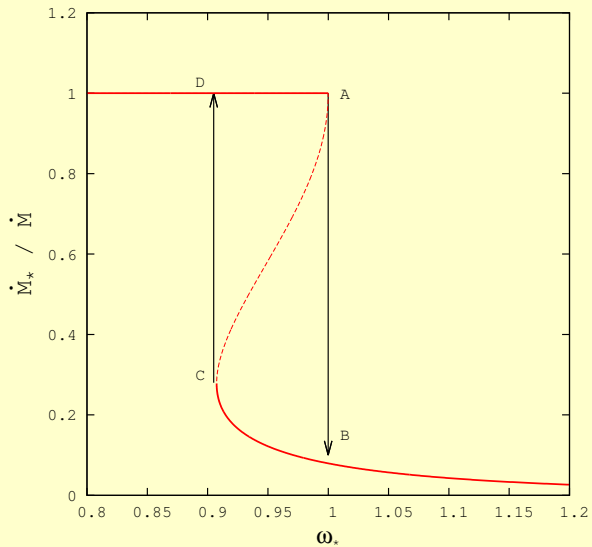


$$f \equiv \frac{\dot{M}_*}{\dot{M}}$$

$$= \frac{2 \int_0^{\theta_c} 2\pi r^2 \sin \theta \rho(r, \theta) v(r, \theta) d\theta}{2 \int_0^{\pi/2} 2\pi r^2 \sin \theta \rho(r, \theta) v(r, \theta) d\theta}$$



Histeresiz



İleri bakış

- Frenleme indisi ölçülmüş tüm pulsarların hızının ölçülmesi.
- Gömülü manyetik alan senaryosunun gerçek yaş-karakteristik yaş uyumsuzluğunu, $P - \dot{P}$ grafiğindeki dağılımı açıklayabilirliği.
- Süpernova kalıntısı disklerin dönme eksenini ile manyetik eksen arasındaki açıya etkisi
- Süpernova kalıntısı disklerde gezegencik oluşumu
- Yüksek dereceli türevler içeren gravitasyon kuramlarında anlamlı çözümler bulmak için “matched asymptotic expansion” yöntemi
- Kütle aktarım aşamasından pervane aşamasına geçiş
- Pervane aşamasından radyo pulsarı aşamasına geçiş
- Her iki geçişte diskin iç yarıçapını belirleyen dinamiğin anlaşılması

Teşekkürler

*We are all in the gutter,
but some of us are looking at the stars.*

Oscar Wilde

*Innocent light-minded men, who think that
astronomy can be learnt by looking at the stars
without knowledge of mathematics
will, in the next life, be birds.*

Plato, Timaeus