

دراسة الحل التحليلي للمنحني الضوئي
للمستعرة العظمى (2000 CX) من النوع الاول (Ia)

آراء مبدر حولي الشيباني
قسم الفيزياء-كلية التربية للبنات-جامعة الكوفة

الخلاصة:

تم في هذا البحث تحليل المنحني الضوئي لمستعرة عظمى من النوع الأول والمعروفة بالمستعرة العظمى (SN 2000cx) باستخدام نموذج الحل التحليلي، وقد تبين من تقارب النتائج الطيفية المرصودة للمستعرة العظمى (SN 2000cx) ونتائج الحل التحليلي بان كتلة النجم المولد لها والمنفجر بتاريخ (17 July 2000) هي (22M_o) وقد قذف مقذوفاته بسرعة 3.55×10^8 cm/sec وبكتلة (13.2M_o) وطاقة انفجار $(1.0 \times 10^{51}$ erg).

Study the Analytical Solution for Light Curve of Supernova (2000CX) of Type Ia

Araa M. H. AL-Shaibany

Dept. of Physics, College of Education for girls, Kufa University

Abstract:

In this research the Analytical Solution for Light Curve of Supernova (2000CX) of Type Ia has been analysed using the Analytical Solution model.

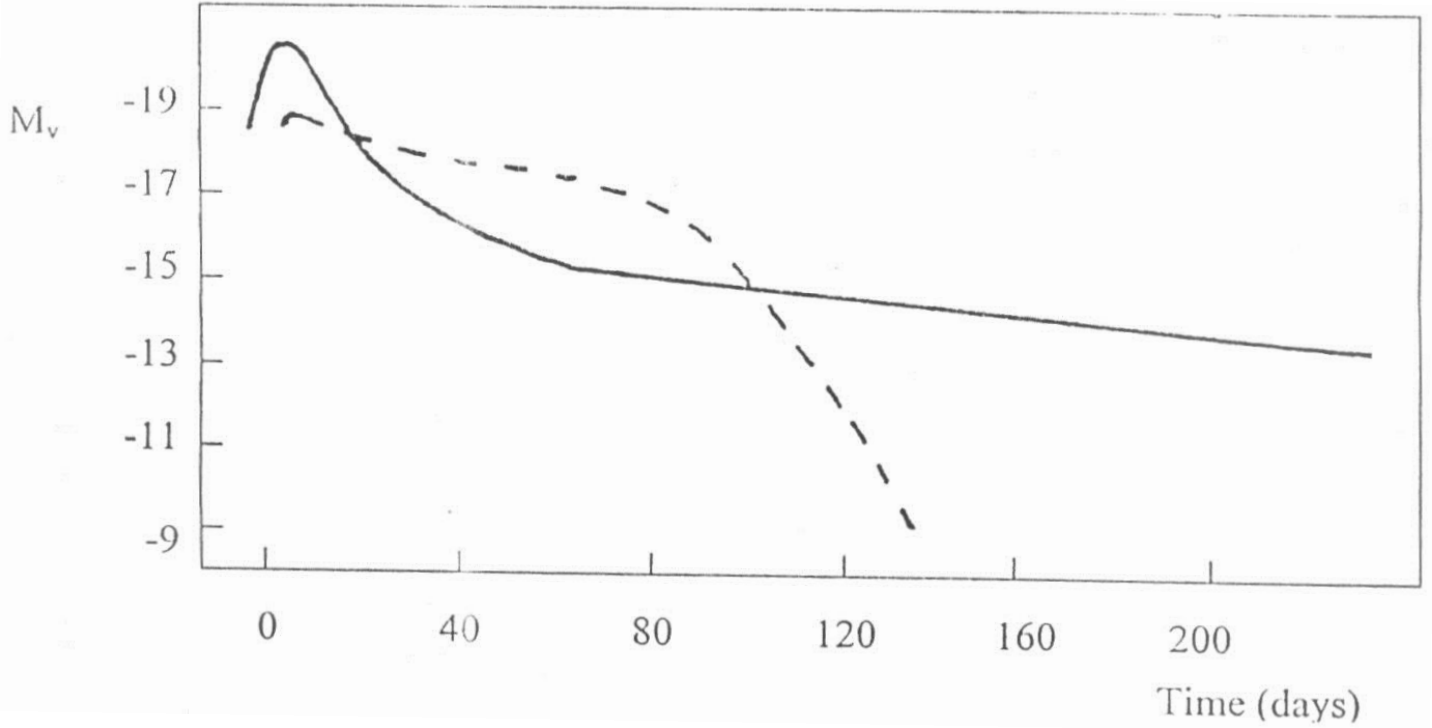
The obtained results where show a good agreement with observed spectral results of SN2000cx .

المقدمة:

تتصف نورانية المستعرات العظمى بشدة تألق عالية تجعلها متميزة خلال عدة شهور، وفي هذه الفترة نفسها يتم الحصول على المنحني الضوئي وعلى الصور الطيفية للنجم المنفجر كمستعرة عظمى. حيث يزداد اللعان أثناء الانفجار ازدياداً سريعاً جداً يصل النهاية العظمى خلال بضعة أيام يعقبه هبوط بطيء نسبياً. ففي النوع الأول من المستعرات العظمى (SN I) ينخفض اللعان بدون تذبذب ويستغرق ذلك مدة طويلة نسبياً، وبعد سنة من الانفجار ينخفض اللعان بضع مئات من المرات، وتتشابه إلى درجة كبيرة منحنيات التألق لنجوم هذا النوع كافة، بينما يتميز النوع الثاني (SN II) بالتباين الكبير في منحنيات تألقه، وسرعة هبوط اللعان بعد مائة يوم تقريبا من النهاية العظمى له. و يوضح الشكل (1) المنحنيات الضوئية لكلا النوعين [1].

أن المستعرات من النوع الأول والثاني تميزان أيضا من خلال غياب أو ظهور خطوط الهيدروجين في الأطياف البصرية على التوالي ويصنف النوع الأول إلى ثلاثة أصناف بحيث يميز نوع (SN Ib) عن (SN Ic) من خلال وجود خطوط (He I) في الأطياف البصرية المبكرة للأول [2]، أما النوع (SN Ia) فهو ينشأ من الانفجار النووي الحراري للأنظمة النجمية الثنائية والمولدة لقزم ابيض (White Dwarf) في نهاية حياتها كمستعرات عظمى ، ومن الامثلة المعروفة عنها (SN1002bo, SN1992bc, SN 1995k) [3] والمستعرة العظمى (SN2000cx) قيد البحث المكتشفة من قبل [4] (Yu, Modjaz and Li (2000)) عن طريق تسجيلهم صور فوتوغرافية لنجم تغيرت إضاءته فجأة للفترة (17.5-18.4 July 2000 UT) باستخدام تلسكوب (KAIT) العاكس والذي قطره (0.76-m) ، حيث أكدت الدراسات البصرية بان المستعرة العظمى (2000cx) تقع في المجرة الحلزونية (SO galaxy (NGC 524) عند المطلع المستقيم (Right Ascension) α ($=1^h 24^m 46.15^s$) ، والميل δ (Declination) ($=+9^\circ 30' 30.9''$) وأيضا أكدت بأنها مستعرة عظمى من النوع (Ia) من خلال وجود خطوط (Si) في الأطياف البصرية المبكرة (early spectra) وأيضا وجود خطوط (Fe) في الأطياف البصرية المتأخرة (late spectra) وذلك لانعدام وجود هذه الخطوط في النوعين (Ib, Ic) وكذلك سلوك المنحني الضوئي لها المتجانس مع بقية المستعرات العظمى من نفس النوع.

أن وصول النجم المولد للمستعرة العظمى لمراحل تطوره النووي النهائية يقترن باضطراب شديد في حالته الغازية الذي ينتقل على شكل موجة قوية تدعى موجة الصدمة (Shock Wave) التي يرتبط ظهورها بالأنضغاط الفجائي الشديد الذي تعانيه الطبقة الغازية المجاورة لموقع الانفجار. أن عملية تولد الصدمة عملية معقدة جدا تحدث نتيجة تقلص فجائي يحدث للنجم ويحول جزء من طاقته الكامنة إلى طاقة حرارية و إشعاعية، تنتقل الطاقة من باطن النجم إلى الطبقات الخارجية بواسطة هذه الموجة، وتحت تأثيرها تتمزق الطبقات الخارجية للنجم مكونة غلافا يأخذ بالتوسع والانتشار. محرراً طاقة إشعاعية يمكن تعيينها بواسطة منحني التألق، وكذلك الأشعة الضوئية التي يحررها النجم أثناء الانفجار كطاقة كهر ومغناطيسية بأطوال موجية مختلفة وأشعة كونية، وبالإضافة إلى طاقة انحلال النشاط الإشعاعي لكل من النيكل والكوبالت (^{56}Co , ^{56}Ni) والتي امتزجت بالمادة المقذوفة بتأثير انتقال الصدمة داخل النجم [4].



الشكل (1) يوضح الشكل المنحنيات الضوئية للنوع الأول (SN I) (الخط المتصل) وللنوع الثاني (الخط المنفصل) والمرسومان بين القدر المرئي والزمن^[1].

النظرية:

تتضمن الحلول التحليلية إدخال تأثيرات أنصاف الأقطار الابتدائية للنجوم المولدة للمستعرات العظمى وكذلك مصدر طاقة انحلال النيكل ^{56}Ni ، ويتم من خلال إجراء بعض الافتراضات الفيزيائية ووضعها في صياغة رياضية. وتبين صحة هذه الحلول من خلال حقيقة الافتراضات ومدى قبولها فيزيائياً. وتتمثل بأربع افتراضات^[4]:-

1. التمدد المتجانس (Homologous Expansion) :- والذي يشير إلى المسار الطبيعي للصدمة الكروية (A spherical Shock).
2. هيمنة الضغط الإشعاعي (Radiation Pressure Dominate) :- أي أن الضغط الإشعاعي للغاز يكون سائد على ضغط الغاز الناتج من كتلته بحكم الجاذبية، وبذلك فأن معادلة الحالة تكون:-

$$E = aT^4V \text{ ----- (1)}$$

تشير الرموز على التوالي:-

E : (Energy Density) كثافة الطاقة الإشعاعية.

a : (Radiation Constant) ثابت الإشعاع.

T : (Surface of Temperature) درجة حرارة سطح النجم المنفجر.

$$P = \frac{E}{3V} = \frac{aT^4}{3} \text{------(2)}$$

ويمثل كل من:

P : (Radiation Pressure) الضغط الإشعاعي.

V : (Specific Volume) الحجم المحدد للمادة المقذوفة.

3. ظهور النيكل (^{56}Ni) في المادة المقذوفة من النجم أثناء الانفجار.

4. توزيع كتلة النيكل (^{56}Ni) يتجمع باتجاه مركز المادة المقذوفة.

ولتبسيط الحل تم افتراض أن مصدر الطاقة الوحيد الذي يتعامل معه أسيا هو الطاقة النووية الناشئة من انحلال النشاط الإشعاعي للنيكل (^{56}Ni) (Radioactivity Decay). وأخيراً تم افتراض أن انفجار النجم المولد للمستعرة العظمى يكون متناظر كروياً (spherical symmetry) [5].

ولأجراء الحل نسلق الطرق التالية [4,5]:-

الحالة الحرارية للغلاف المقذوف والمتمدد تتغير مع الزمن وفقاً للقانون الأول في الترموديناميك:-

$$\dot{E} + P\dot{V} = -\frac{\partial}{\partial m} L + \varepsilon \text{------(3)}$$

$$\frac{L}{4\pi r^2} = -\left(\frac{\lambda c}{3}\right) \frac{\partial}{\partial r} (aT^4) \text{------(4)}$$

حيث تمثل:-

\dot{E} : مشتقة طاقة إشعاع الغاز الحرارية $\dot{E} = 4 aT^3 V \dot{T} + aT^4 \dot{V}$.

\dot{V} : مشتقة حجم المادة المقذوفة والذي يتناسب مع كثافتها $\rho (V = \frac{1}{\rho})$.

L : (Luminosity) النورانية وتمثل مقدار الطاقة الإشعاعية الكلية المنبعثة من سطح النجم المنفجر.

m : (Mass ejected) كتلة المادة المقذوفة.

ε : طاقة انحلال النشاط الإشعاعي للنيكل.

r : نصف القطر للمقذوفات.

λ : (Mean Free Path) معدل المسار الحر للفوتونات $\lambda = \frac{1}{\rho\kappa}$.

k: اللانفاذية أو العتمة. (Opacity)

c: سرعة الضوء.

بعد تعويض \dot{E} (كل من المعادلات (2)، (4) في معادلة (3) ينتج:-

$$4 T^4 \left(\frac{\dot{T}}{T} + \frac{\dot{V}}{3V} \right) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{c}{3\rho\kappa} r^2 \frac{\partial T^4}{\partial r} \right) + \varepsilon \text{----- (5)}$$

ولإيجاد الحل الدقيق للمعادلة أعلاه، يتم فصل متغيراتها المعتمدة على الفضاء (r)، عن متغيراتها المعتمدة على الزمن (t)، حتى الحصول على المعادلة التالية:

$$T_e(t) = 15,493K \left(\frac{M_{Ni}^{\circ}}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{10^8 \text{ cm/sec}}{v_{sc}} \right)^{1/4} \left(\frac{\Lambda(x, y)}{x^2 y^2} \right)^{1/4} \text{---- (6)}$$

إذ تمثل كلا من:

(M_{Ni}°/M_{O}) : كتلة النيكل نسبة لكتلة الشمس (Solar mass)، إذ أن كتلة النيكل تحسب من

العلاقة $^{[5]}(M_{Ni} = 0.1 * M_{t} X_{Ni}(0))$

$X_{Ni}(0)$ ووفرة تواجد النيكل في الكتلة المقذوفة.

v_{sc} : (Ejects velocity scale) مقياس سرعة المقذوفات.

حيث أن $\Lambda(x, y)$ تمثل :-

$$\Lambda(x, y) = \exp(-x^2) \int_0^x (-2xy + x^2) 2x dx \text{----- (7)}$$

$$x = t / \tau_m \text{----- (8)}$$

$$y = \tau_m / 2\tau_{Ni} \text{----- (9)}$$

حيث ان:

t: الزمن من لحظة الانفجار.

τ_m : (diffusion time scale) مقياس زمن الانتشار والذي يتعين من سلوك المنحني الضوئي للمستعرات العظمى.

τ_{Ni} : (Radioactivity decay time) زمن انحلال النيكل (^{56}Ni).

وعلى اعتبار النجم المنفجر يبعث إشعاعه كأبي جسم اسود فعندئذ نستخدم قانون سيفان – بولتزمان لحساب النورانية الذي ينص على أن مقدار الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود في وحدة الزمن تتناسب طردياً مع مربع نصف قطره (مساحة سطحية) والقوة الرابعة لدرجة الحرارة الفعالة وبذلك فإن نورانية السطح للنجم المنفجر (The luminosity at surface) تعطى بالعلاقة :-

$$L(1, t) = 4\pi R(t)^2 \sigma T_e(t)^4 \text{----- (10)}$$

حيث تمثل:

$T_e(t)$: درجة الحرارة الفعالة (Effective temperature) لسطح النجم المنفجر.
 σ : ثابت ستيفان-بولتزمان ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

ويمثل $R(t)$ نصف قطر المقذوفات بعد الزمن (t) من الانفجار والذي يكون اكبر بكثير من $R(0)$ الذي يمثل نصف القطر الصفري للنجم المنفجر (نصف القطر الابتدائي للنجم قبل الانفجار).
 ويعطى بالمعادلة التالية:-

$$R(t) = R(0) + v_{sc}t \quad (11)$$

وبذلك تختصر المعادلة (11) الى الشكل التالي:

$$R(t) = v_{sc}t \quad (12)$$

وتحسب سرعة المقذوفات من العلاقة:

$$v_{sc} = \sqrt{3.3333 \frac{E_K}{M_{ej}}} \quad (13)$$

يلاحظ من المعادلة (6) بأن قيمة درجة الحرارة الفعالة $T_e(t)$ تعتمد على كل من (v_{sc}) التي بدورها تعتمد على طاقة إنفجار المستعرة العظمية (E_K) والكتلة المقذوفة أثناء الانفجار (M_{ej}) ونصف القطر الابتدائي للنجم قبل الانفجار $R(0)$ عند الزمن $t=0$ وكتلة النيكل ووفرتة (^{56}Ni) التي بدورها تعتمد على الكتلة الكلية للنجم.

النتائج والمناقشة:

كان لحدوث المستعرة العظمية (1987A) في (23 شباط 1987) فرصة ثمينة اختبرت من خلالها التصورات النظرية لأساليب حسابات المنحنيات الضوئية، حيث تحقق للعلماء نجاح كبير في هذا المجال^(7,8). استخدم لهذا الغرض أسلوبين مختلفين، تمثل الأول بأسلوب التحليل العددي (Numerical Analysis) باستخدام طريقة الفروق المنتهية (Difference method finite) وهي طريقة مطولة في الحل ومعقدة في الوقت نفسه. أما الأسلوب الآخر، فقد تمثل بالحلول التحليلية (Analytical Solutions) التي أثبتت توافق كبير مع نتائج الارصادات. اعتمدت هذه الدراسات على متابعة التغير الزمني للضيائية باستخدام معادلات تفاضلية اعتيادية (Ordinary (ODE Differential Equations) بدلا من معادلات تفاضلية جزئية (Partial Differential Equations) (PDE)⁽⁸⁾.

قد تم تحليل النتائج المرصودة للمستعرة العظمية (2000cx) من المرصد العالمية :-

1. تغير درجات الحرارة المؤثرة (T_{eff}) [Effective Temperature] مع الزمن ومقارنتها مع أرصادات (T_{eff}) المسجلة من قبل المرصد (YLAO-Data)⁽⁴⁾ المبينة في الشكل (1) والذي يوضح كيفية تغير درجات الحرارة المؤثرة مع الزمن. بينت دراسة الارصادات حدوث هبوط في (T_{eff}) خلال الأيام [(10-27)days] الأولى من الانفجار مع حصول انحراف عند درجة

الحرارة ($5.1 \times 10^4 \text{ K}^\circ$) تستمر درجة الحرارة بالاستقرار عند هذه القيمة لفترة ثمانين يوماً تقريباً.

2. أن مقارنة التغير الزمني للوغار يتم النورانية البولومترية (Bolometric Luminosity) مع أرصادات (YLAO-Data)⁽⁴⁾ للمنحنى الضوئي للمستعرة العظمى (2000cx) تحت الدراسة الموضحة بالشكل (4)، أكدت بأن هذه المستعرة العظمى من النوع الأول (Ia) كما أسلفنا. نلاحظ من خلال الشكل (3) انخفاض سريع في نورانية النجم بعد [10-27]days من الانفجار، حيث تمثل هذه الفترة الزمنية مرحلة انهيار النجم، وعند لحظه وصول موجة الصدمة (Shock wave) إلى سطحه تزداد نورانيته وتصل أقصى قيمة لها في اليوم العاشر بعد ذلك تأخذ النورانية بالتناقص وعند الفترة الزمنية [30-80]days تظهر على المنحنى الضوئي بوادر انحلال أسي في نورانيته .
إما نتائجا الحالية وفقاً لهذا النموذج موضحة في الجدول (1) والذي يشير إلى النتائج المستعرة العظمى (2000cx) وفقاً لنموذج الحلول التحليلية للمنحنيات الضوئية للمستعرات العظمى.

النموذج التحليلي	الكمية
$22 M_o$	الكتلة الكلية الافتراضية للنجم المنفجر M_{total}
1.0×10^{51}	طاقة الانفجار الافتراضية للمستعرة العظمى $E_{SN}(\text{erg})$
$13.2 M_o$	الكتلة المقذوفة M_{ej}
3.55×10^8	مقياس السرعة $v_{sc} \times 10^8 (\text{cm/sec})$
0.44	كتلة النيكل ^{56}Ni (M_o) M_{Ni}
7.88×10^{11}	نصف القطر الابتدائي $R_o (\text{cm})$
7.605×10^5	زمن انحلال النيكل ^{56}Ni τ_{Ni} sec $(^{(6)})$
3.89×10^{10}	طاقة انحلال النيكل ^{56}Ni $\epsilon_{Ni} (\text{erg g}^{-1} \text{sec}^{-1})$

جدول رقم (1)

يبين النتائج الحالية للمستعرة العظمى (2000cx) وفقاً لنموذج الحلول التحليلية للمنحنيات الضوئية للمستعرات العظمى.

تضمنت النتائج الموضحة في الجدول (1) نموذج اعتمد على الكتلة الكلية النجمية (M_{total}) المفترضة للنجم المولد لـ (2000cx) التي أشارت الدراسات إلى أن قيمتها بحُدود $(3 \pm 19 M_{\odot})^{(6)}$ اعتمدت طاقة انفجار المستعرة العظمى (2000cx) [6] بقيمة $(1.0 \times 10^{51} \text{erg})$ والكتلة المقذوفة في $(0.6 M_{total})$ ، وذلك لأن قيم (v_{sc}) المستنتجة وفق هذه النسبة من القذف من العلاقة (9) توافق قيم سرعة 0 (2000cx) التي حددتها اغلب الارصادات الطيفية، كذلك فإن قيم الكتل المقذوفة وفق هذه النسبة تقع ضمن حدود كتل مقذوفات (2000cx) والتي تقع قيمها بين $(7 M_{\odot})^{(6)} \leq M_{ej} \leq 15 M_{\odot}$.

ان التغير الزمني لكل من درجات الحرارة المؤثرة (T_{eff}) ولو غار يتم النورانية البولومترية للنجم المنفجر كمستعرة عظمى ومقارنتها مع نتائج دراسة مرصد (YLAO-Data) ⁽⁴⁾ تم عرضها في الاشكال (3,4) .

بما ان وفرة النيكل تعطى بـ $(X_{Ni}(0) \geq 0.1)^{(7)}$ ، تم حساب كتلة النيكل ^{56}Ni (M_{Ni}) باعتماد القيمة $(X_{Ni}(0)=0.2)$ ، لأنها أعطت افضل النتائج.

بين الشكل (3) وفقاً للنموذج الحالي للدراسة بالنسبة للتغير الزمني لـ (T_{eff}) مدى تأثير أنصاف الأقطار الابتدائية (R_0) على قيم التغير الزمني لدرجات الحرارة المؤثرة (T_{eff}) والسبب في انخفاض قيمة الكثافة للمادة النجمية وهذا مما أدى الى تناقص في (T_{eff})، اذ أن العلاقة بين T_{eff} و P علاقة طردية بينما تكون العلاقة بين T_{eff} و $(R_0 \propto \frac{1}{R_0})$ ، وهذا واضح من

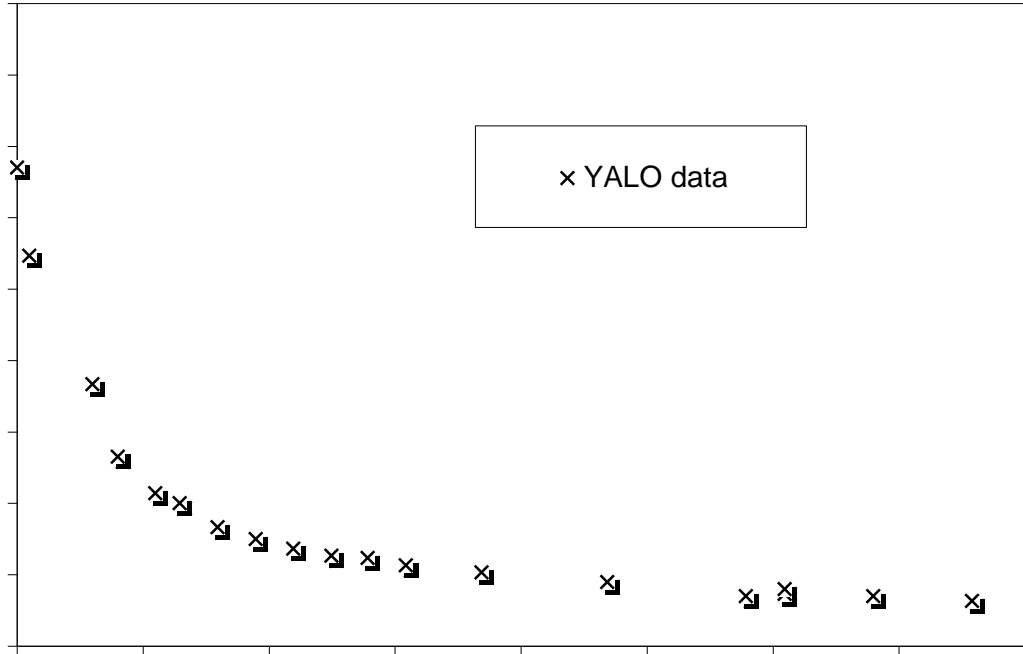
العلاقة $(T_{eff} \propto 1/v_{sc})$ ، لان زيادة كتلة النيكل تعني زيادة قيمة كثافة المادة النجمية وبالتالي تناقص في نصف قطر النجم المولد للمستعرة العظمى يرافقه زيادة بالضغط الإشعاعي الذي يؤدي زيادته عادة الى تزايد في قيم T_{eff} .

اما فيما يخص نورانية (Luminosity) النجم تحت الدراسة الحالية المبينة في الشكل (4) يوضح لنا مدى تأثير أنصاف الأقطار الابتدائية (R_0) على نورانية النجم المنفجر كمستعرة عظمى، اذ يوضح الشكل أن تناقص R_0 يترافق مع زيادة قيم نورانية النجم المنفجر المتغيرة مع الزمن، وذلك لانه في انخفاض قيم نصف القطر الابتدائي R_0 للنجم المولد للنجم المنفجر يؤدي الى تزايد في الضغط الإشعاعي (P) المولد لموجة الصدمة (Shock wave) التي بدورها تزيد من سرعة الكتلة المقذوفة نتيجة الانفجار. وان حصول زيادة في تسطح المنحني الضوئي للنورانية كلما كبر نصف قطر الانفجار أكد بان الانفجار الذي يعاينه النجم المولد للمستعرة العظمى هو دالة لنصف قطره الابتدائي قبل الانفجار ⁽⁸⁾. وان تأثير كتلة النيكل ^{56}Ni (M_{Ni}) الممتزجة مع كتلة المادة المقذوفة اثناء الانفجار التي بزيادتها تزداد نورانية النجم المنفجر وان ظهور الانحلال الاسي لنورانية النجم المنفجر كمستعرة عظمى أكد بأن المادة المقذوفة من النجم اثناء الانفجار قد امتزجت معها كتلة النيكل ^{56}Ni (M_{Ni}) عند انتقال موجة الصدمة (Shock Wave) من مركز النجم المنفجر إلى السطح، وأنها سرعان ما تعاني من انحلال إشعاعي وذلك لأنها نويات نشطة إشعاعياً

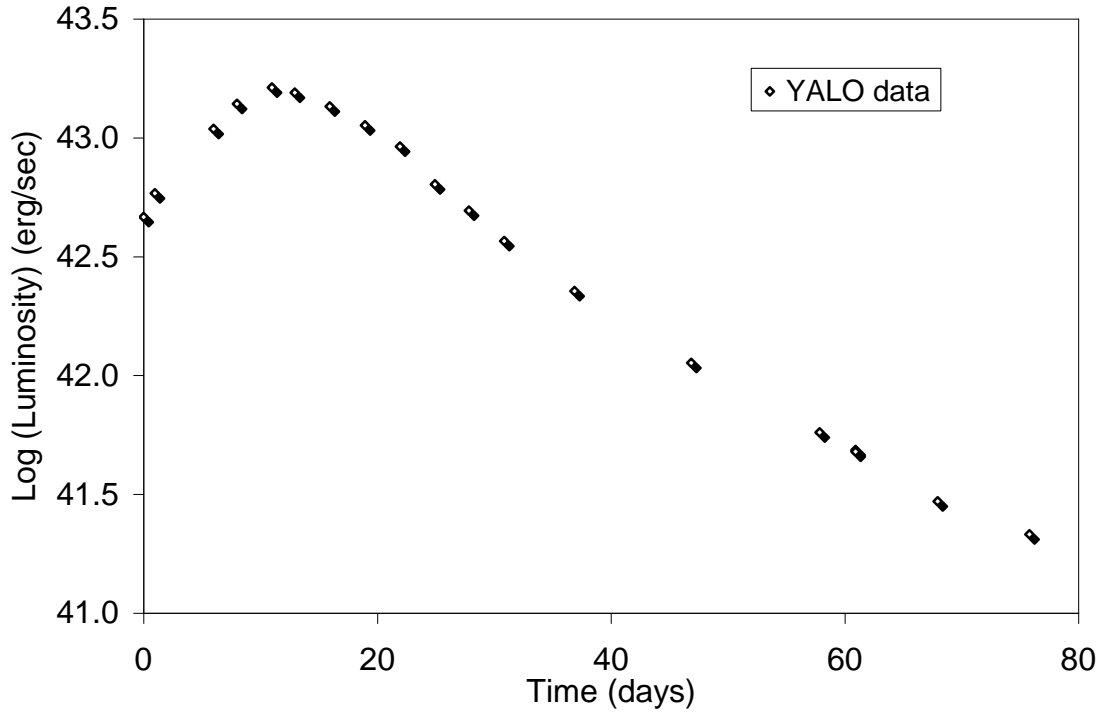
(Radioactivity) وهذا ما كان دليلاً مباشراً على حدوث عمليات التركيب النووي داخل النجم قبل أن يعاني انفجاراً كمستعرة عظمى (Supernova) ⁽⁹⁾. من خلال الحلول التحليلية للمنحنيات الضوئية للمستعرة العظمى (2000cx) للدراسة الحالية وجد أن أفضل نموذج تحليلي حصل فيه تطابق بين قيم المنحني الضوئي المرصود ونتائج الحل التحليلي هو عندما تكون كتلة النجم الكلية المفترضة $(M_{total} = 22M_{\odot})$ وبنصف قطر ابتدائي مقدر بـ $(R_0 = 7.88 \times 10^{11} \text{cm})$ وبتكثف نيكل ^{56}Ni $(0.44 M_{\odot})$ ممتزجة ضمن كتلة المادة المقذوفة $(13.2M_{\odot})$ وبسرعة قياسية $v_{sc} (3.55 \times 10^8 \text{cm/sec})$ ، وبالتالي كان افتراضاً موفقاً للحصول على أفضل نموذج فيما يخص قيمة طاقة الانفجار $(E_{SN} = 1.0 \times 10^{51} \text{erg})$.

المصادر:-

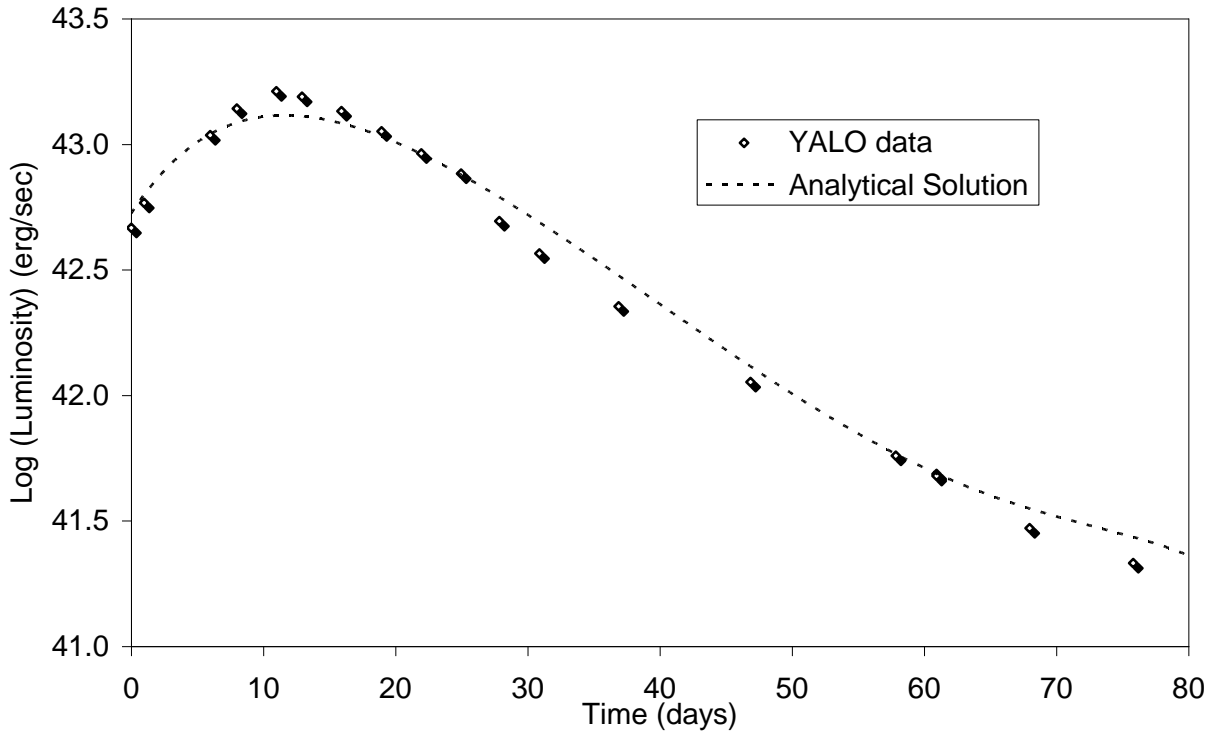
1. J.G.Henny, "Supernovae and Supernovae Remnants" in Diffuse Matter in Galaxies, P.45, D.Reidel publishing company, Dordercht-Holland, (1983).
2. S.D. Van Dyk, M.Hamuy, A.V.Filippenko, Astron.J., 111, 2017, (1996).
3. M.Hamuy and P.A.Pinto, Astro.J., 117, 1185, (1999).
4. P.Candia, K.Krisciunas, B.Suntzeff, D.Gonzalez, J.Espinoza, R.Leiton, A.Rest, R.Smith, J.Cuadra, T.Tavener, C.logan, K.Snider, M.Thomas, A.A.West, S.Gonzalez, M.M.Phillips, N.C.Hastings and R.McMillan, Astrophys.J., 1, 3, (2003).
5. W.D.Arentt, Astrophys.J., 237, 541, (1980).
6. W.D.Arentt, Astrophys.J., 253, 785, (1982).
7. S.W.Falk and W.D.Arentt, Astrophys.J.Sup.Series, 33, 515, (1977).
8. W.D.Arentt, Astrophys.J., 343, 834, (1989).
9. R.P.Kirshner, Supernova 1987A in Large Magellanic Cloud, (Cambridge University press) P.87, (1988).



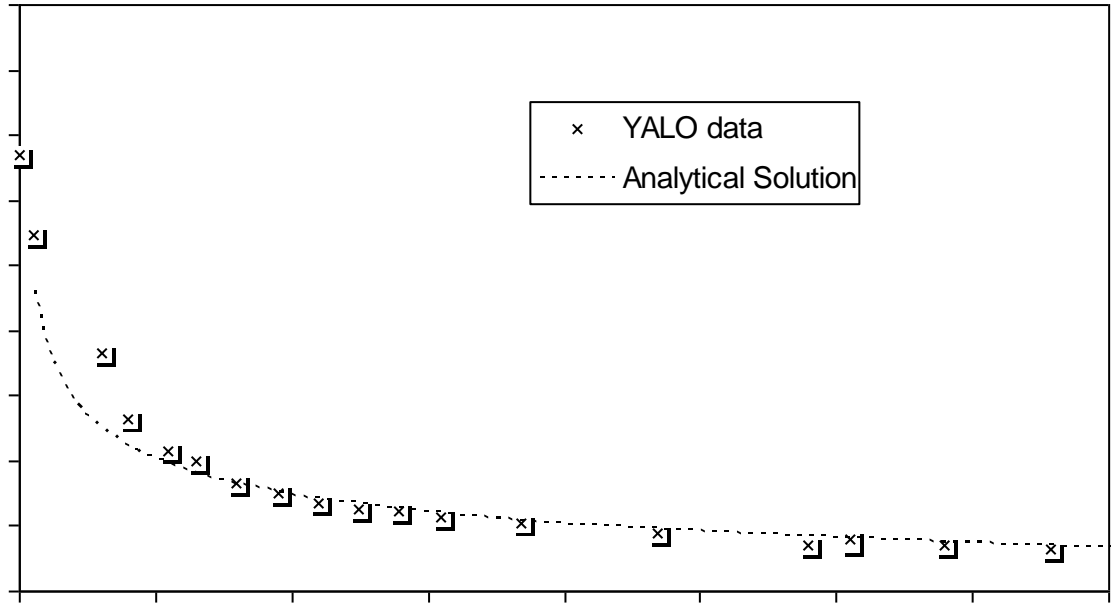
الشكل (2) تغير السلوك الزمني لدرجات الحرارة المؤثرة (T_{eff}) منذ بداية انهيار قلب النجم المولد لـ (2000cx) ووفقا لارصادات (YLAO-Data)⁽⁴⁾.



شكل (3) التغيير الزمني للوغار يتم النورانية البولومترية بوحدات (erg sec^{-1}) للنجم المولد لـ (2000cx) بداية انهياره إلى لحظة الانفجار وفقاً لإرصادات مرصد (YLAO-Data) ⁽⁴⁾.



شكل (4) يوضح مقارنة بين نتائج النموذج طبقاً للدراسة الحالية ونتائج دراسة إرصادات (YLAO-Data) فيما يخص التغيير الزمني للوغار يتم النورانية البولومترية للنجم المنفجر لمستعرة عظيمة (2000cx).



شكل (5) يوضح مقارنة بين نتائج النموذج طبقاً للدراسة الحالية ونتائج دراسة ارسادات (YLAO-Data) فيما يخص التغير الزمني لدرجات الحرارة الفعالة للنجم المنفجر لمستعرة عظمى (2000cx).