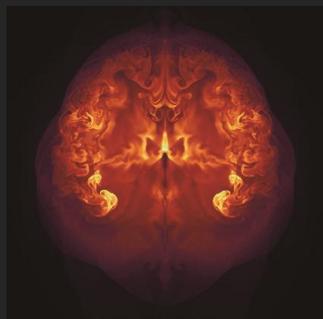


超新星多次元輻射輸送計算の進展

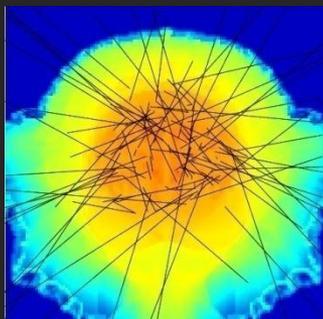
前田 啓一

東京大学 数物連携宇宙研究機構 (IPMU)

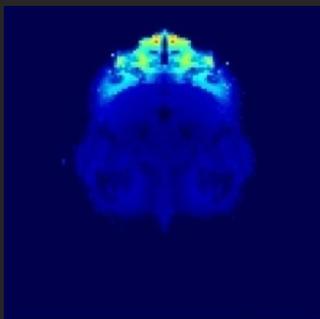
Keiichi.maeda@ipmu.jp



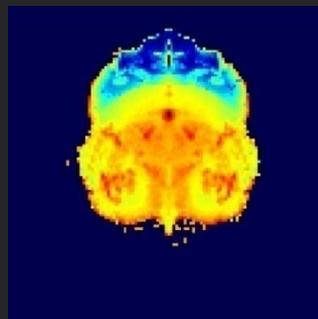
密度



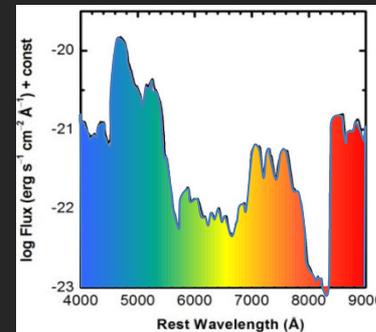
輻射輸送



電子温度



イオン状態



スペクトル

内容

- 超新星膨張物質内での輻射過程 & 輸送まとめ。
- 最近の進展: 新しい多次元輻射計算コード。
- 今後の方向 + まとめ。

爆発モデルをインプットとし、パラメータ・フリーで多波長 (NIR – MeV) 光度曲線・スペクトル進化計算が可能。

超新星の観測的特長(可視-NIR)

- 年間500個以上発見(2006年557個、2007年584個)。
 - 詳細な観測がなされるのは一握り。
- 典型的には、 $> \sim 10$ Mpc (up to $z \sim 1$)。
 - 点源。
 - 典型的な最大光度 $V \sim 16 - 18$ mag (roughly).

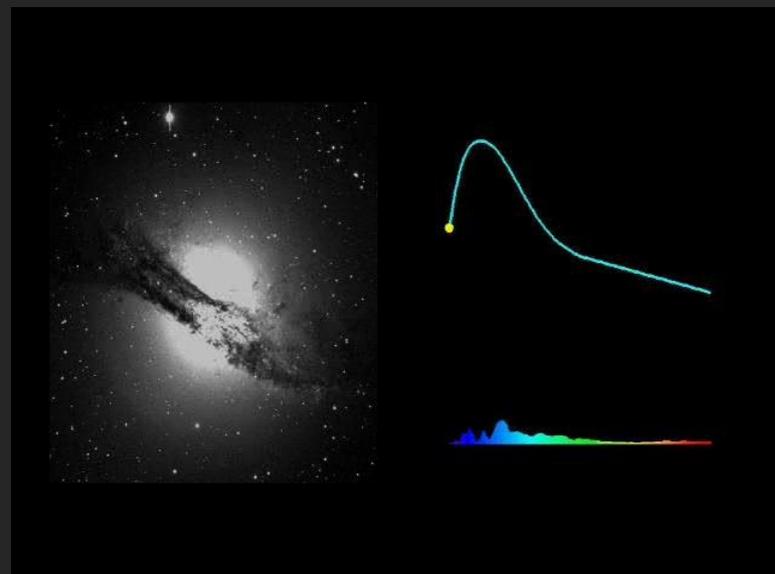


- 観測の大部分 = 可視光。
 - 測光 + 分光 (+ 偏光)



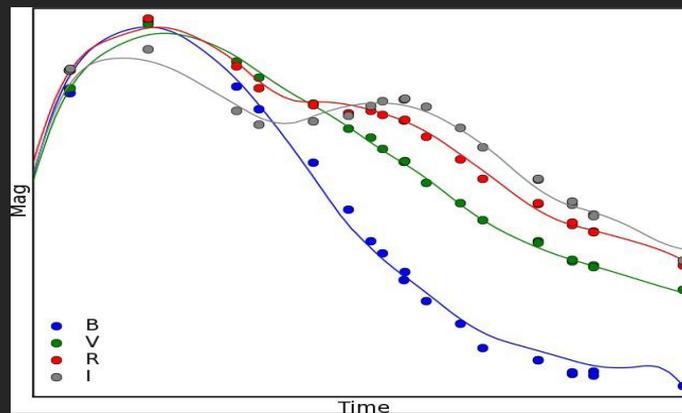
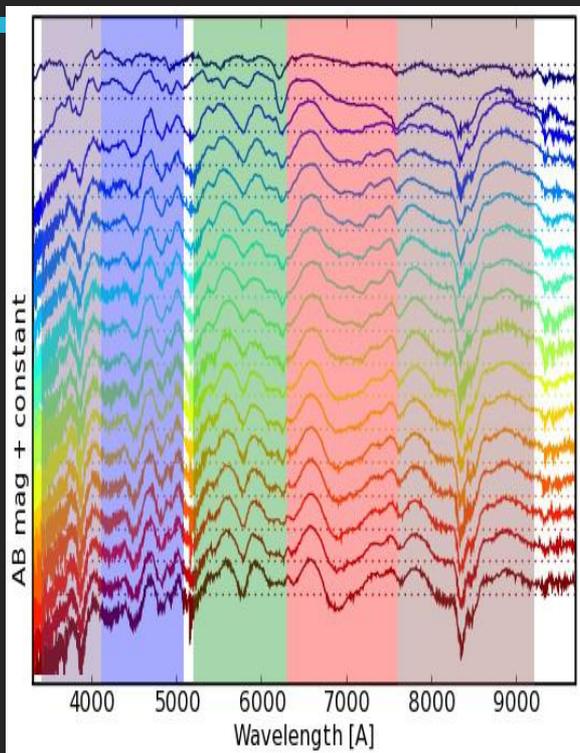
解釈 ← 輻射計算

超新星における物理(爆発機構等)



観測例

時間



Looking at
SN 2011fe
from Kashiwa
(w/ 20cm,
w/o CCD)

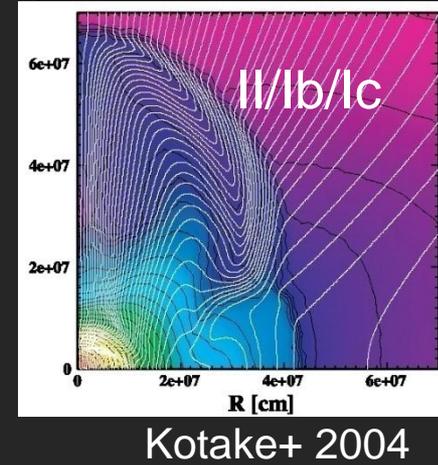
密度分布、元素組成/分布
などの情報
⇒爆発モデルへの強い制限

球対称から多次元へ

SN 1987A: 多次元的

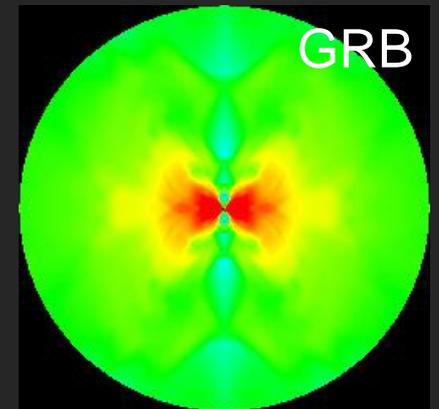
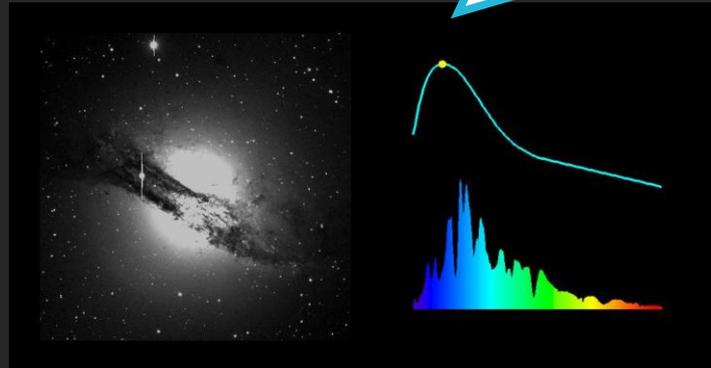


爆発理論: 多次元的



超新星: 点源

< 2004-2006
球対称を仮定
した輻射計算

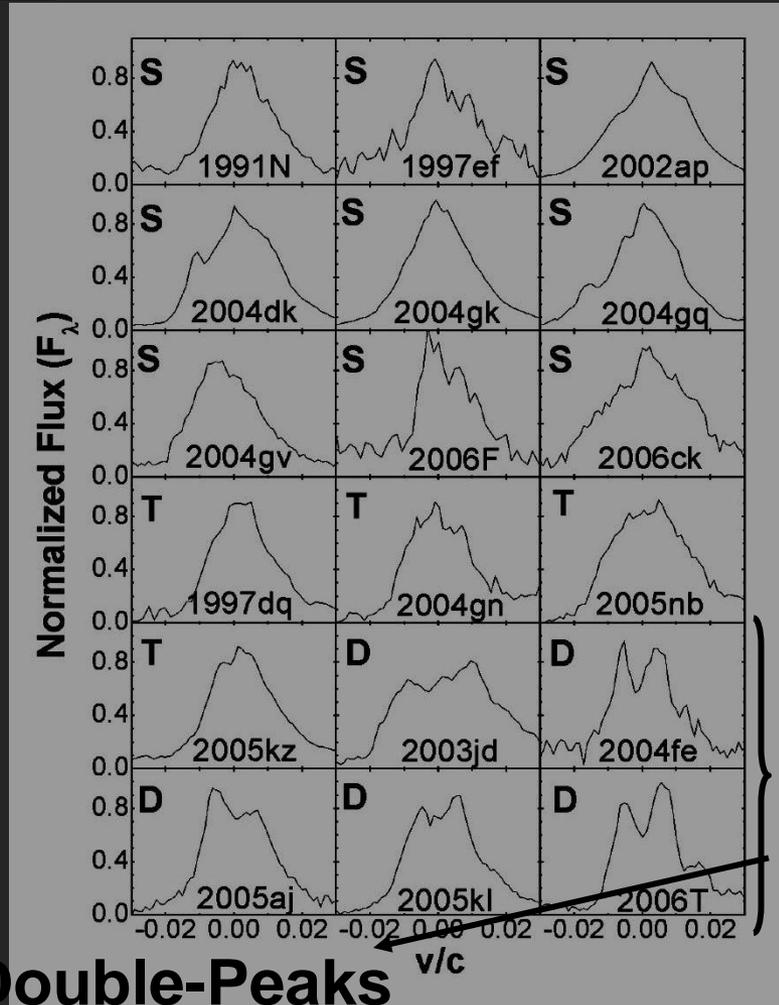
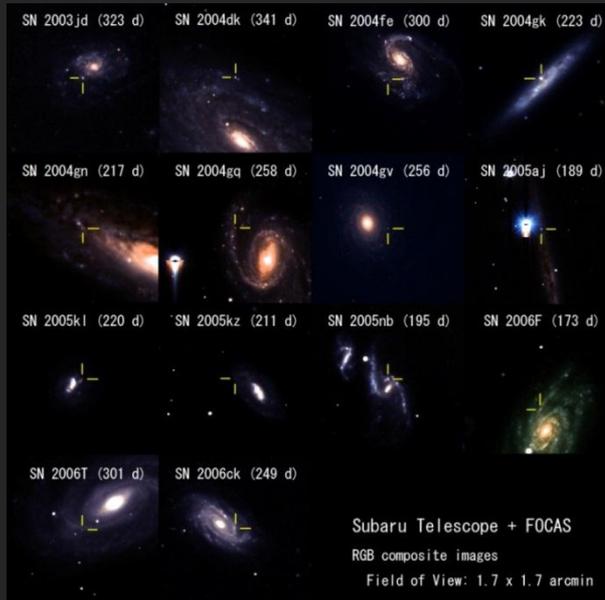


MacFadyen & Woosley 1999

球対称からのズレの観測的示唆の例

後期スペクトル(KM+)

初期偏光スペクトル(Tanaka+)



Ib/c型スペクトル@~1年, by FOCAS/Subaru。

KM, Kawabata, Mazzali+ 2008, Science, 319, 1220

c.f., Ia型も非対称: KM, Benetti, Stritzinger+ 2010, Nat.

Double-Peaks

- 球対称物質からの後期放射は”必ず”一山(←輻射計算)。

観測から情報を引き出す：輻射計算

爆発＋元素合成：＜秒一分

$$R < 10^{10-11} \text{cm}$$

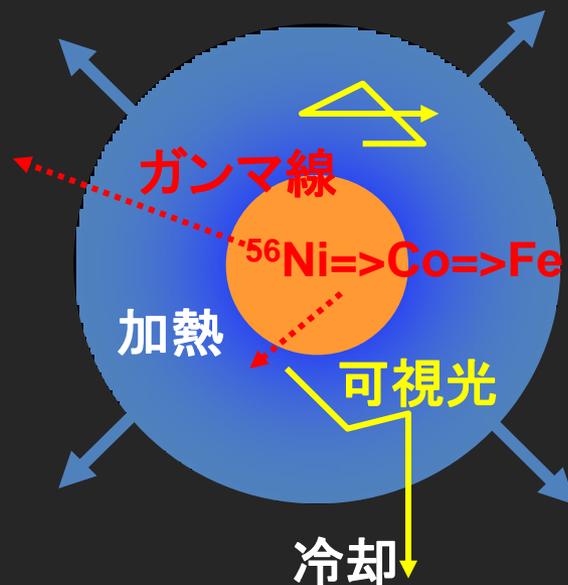
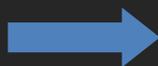
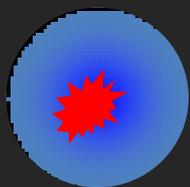
観測：日～年

$$R \sim 10^{14-17} \text{cm}$$

例：Ia/b/c型

膨張：

Thick \Rightarrow Thin



初期 (< 1か月)
可視散乱・吸収

後期 (> 1か月)
NLTE

輻射過程 / 輸送

- 多次元構造 (密度、元素、熱源)
- 時間依存
- 重元素リッチ
- 高速膨張
- ガンマ線 \rightarrow 可視光

“Homologous Expansion”

速度

$\sim 10,000 \text{ km/s}$

動径距離



輻射から見た超新星Energetics

- Ia/b/c型を例に...

- $E_K \sim 10^{51} \text{erg}$

- $E_{\text{decay}} \sim 3 \times 10^{48} \text{ erg } (M_{56\text{Ni}}/0.1M_{\odot})$

- $E_{\text{th}} \text{ (by shock)} \sim E_K \times (Vt/R_0)^{-4} \sim 10^{35} \text{ erg @ 10 day}$

- $E_{\text{th, shock}} \ll E_{\text{decay}} \sim E_{\text{rad}} \ll E_K$

輻射⇒温度、イオン化状況

輻射⇒運動状況に影響しない

輻射流体計算は(一般に)必要ない

II型では $E_{\text{decay}} \sim E_{\text{th, shock}}$ だが解くべき問題は同様。

多次元輻射計算:これまでの状況

2006 – 2011 (“SAMURAI”)

	初期 (Thick, week ~ month)	後期 (Thin, month ~ year)
光度曲線	KM 2006, KM+2006 In: 爆発モデル Out: Bolometric 熱源: 放射性元素 (^{56}Ni) or hard-X (パルサー) 仮定: 可視/UV Opacity=現象論的 (+波長平均)	
スペクトル	Tanaka+2006,7 In: 爆発モデル +光度+光球速度 Out: スペクトル 仮定: 光度、光球	KM+2006 In: 爆発モデル Out: スペクトル 仮定: fully optically thin

本来は、輻射輸送⇒光度・光球(output)

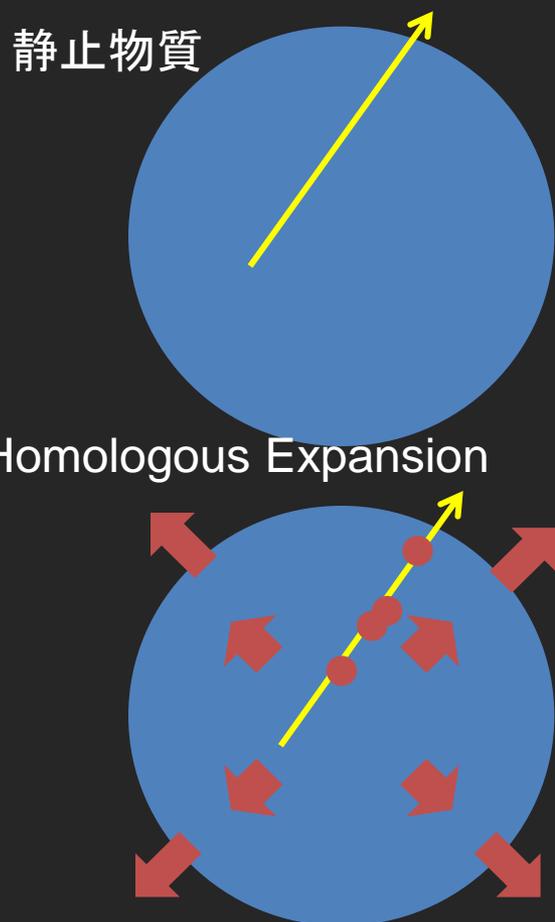
LBNL/Kasen: “Sedona”

MPA/Kromer+Sim: “ATIS”

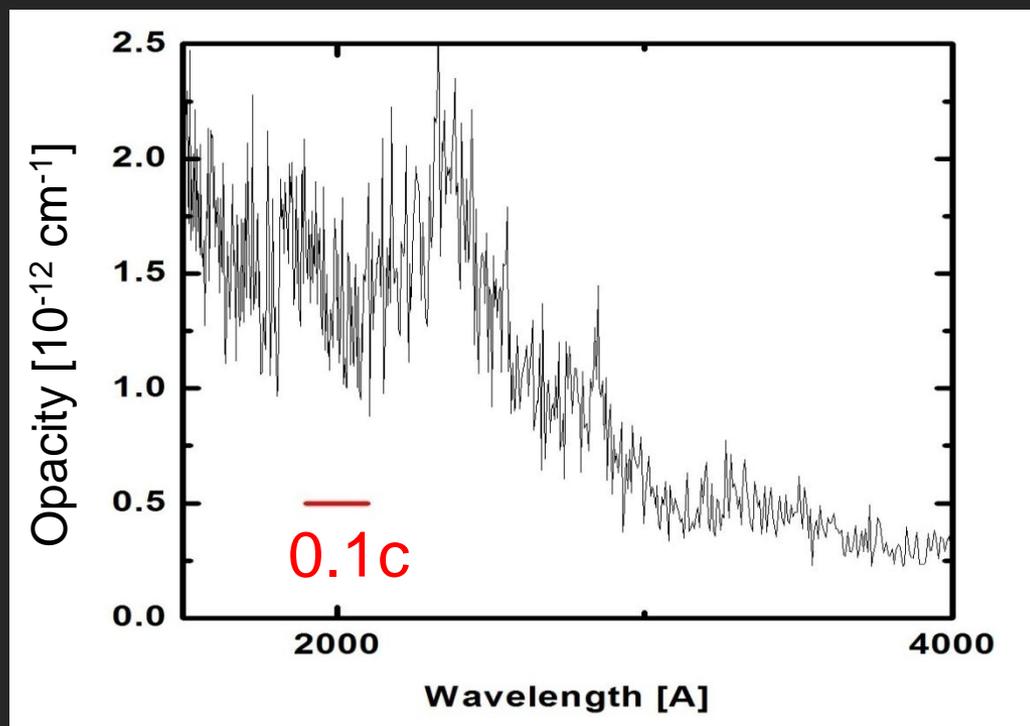
超新星輻射輸送の特徴@初期

- 重元素リッチ+高速膨張

⇒opacityへの影響。



計算例 (Fe-rich)



物質静止系での波長が変化
 $\Delta\lambda \sim v/c \times \lambda \ll$ 原子準位のつまり具合
⇒“共鳴”： ライン吸収

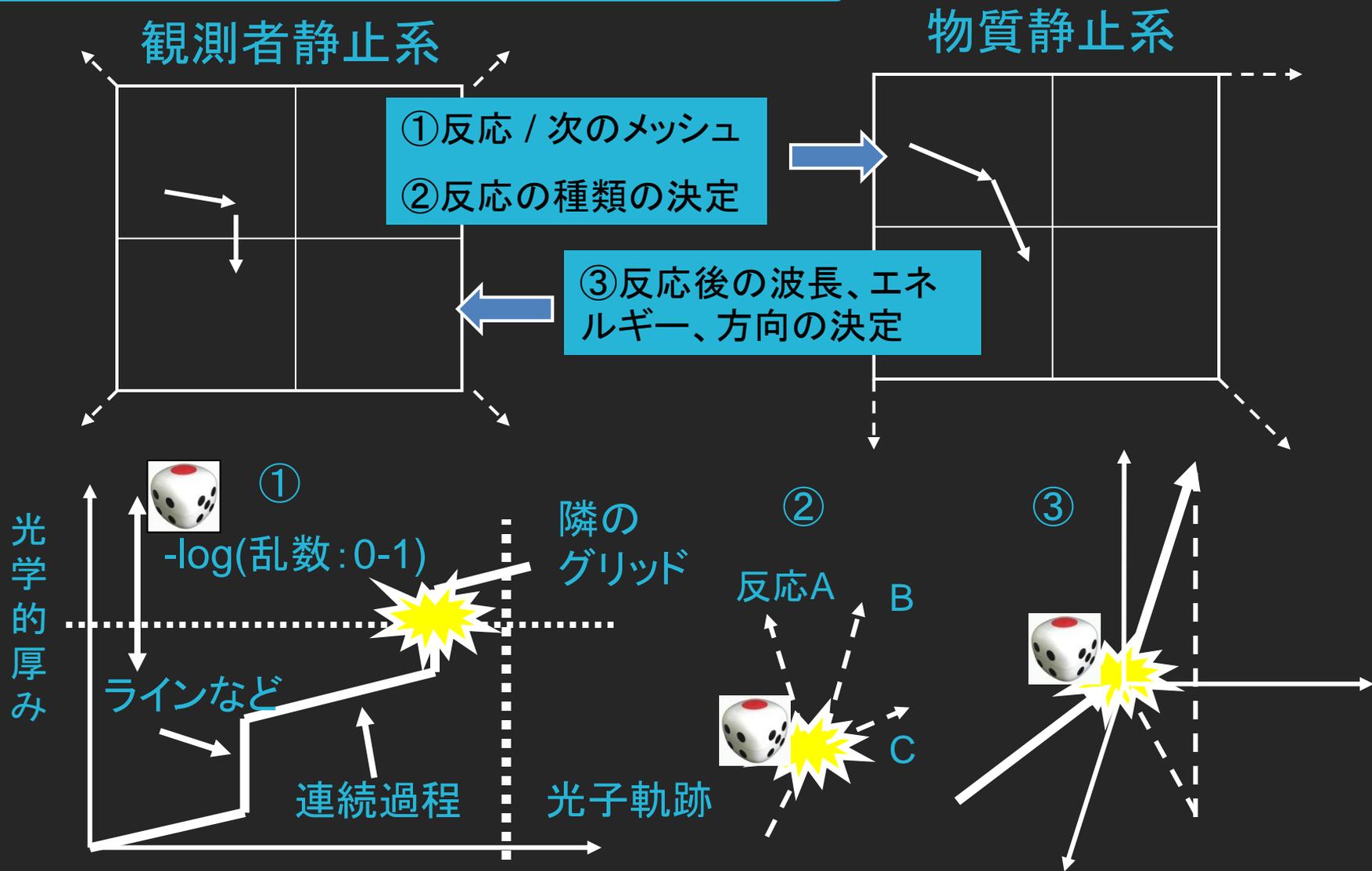
新しい多次元輻射輸送計算コード

KM, in prep.

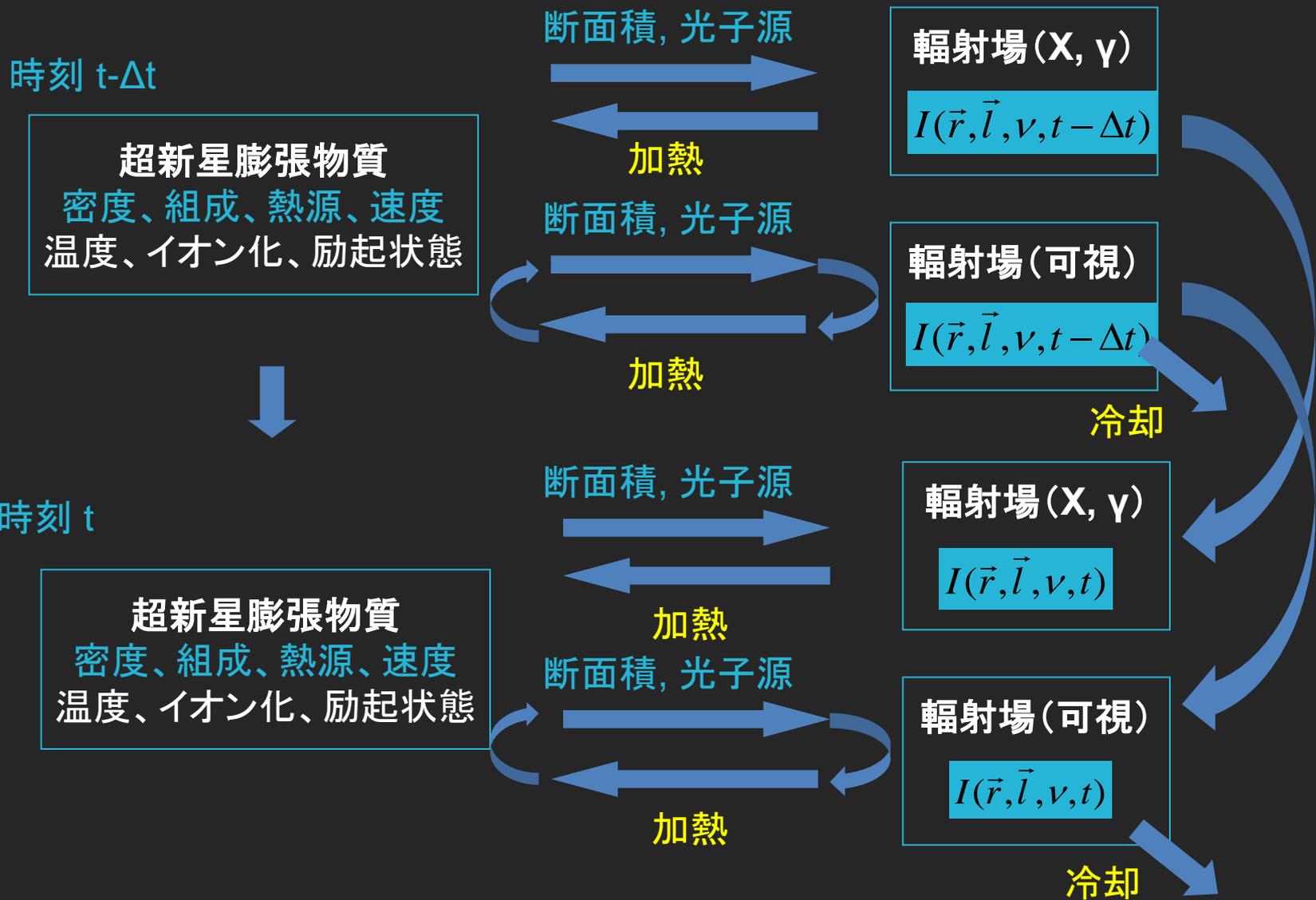
Handling **E**mission In **M**ulti-**D**imension for spectr**A**L and L**i**ght **c**urve calculations
Multi-D Multi-frequency Time-dependent

- パラメータ・フリー (No adjustable param.)。
 - 爆発モデル⇒スペクトル＋光度曲線 (NIR - MeV)。
- 光球を仮定せず熱源からconsistentに解く。
- 輻射⇔物質→イオン化、温度→opacity。
 - 現段階：LTEを仮定。
- 任意の熱源に対応。
 - 現段階： $^{56}\text{Ni}/\text{Co}$ 崩壊＋爆発の際の熱エネルギー。
- Monte-Carlo。hybrid並列 (open-MP + MPI)。
- No black box。

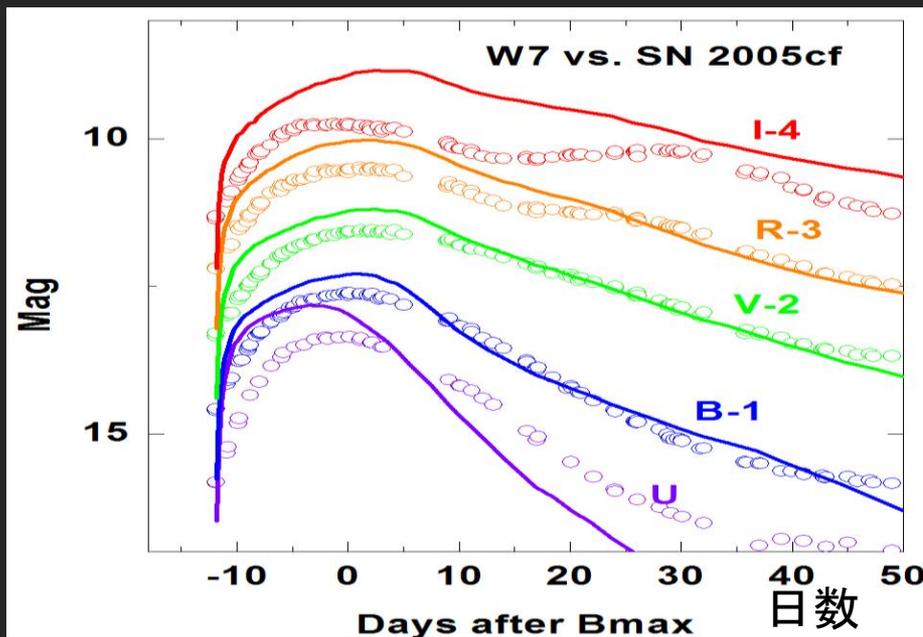
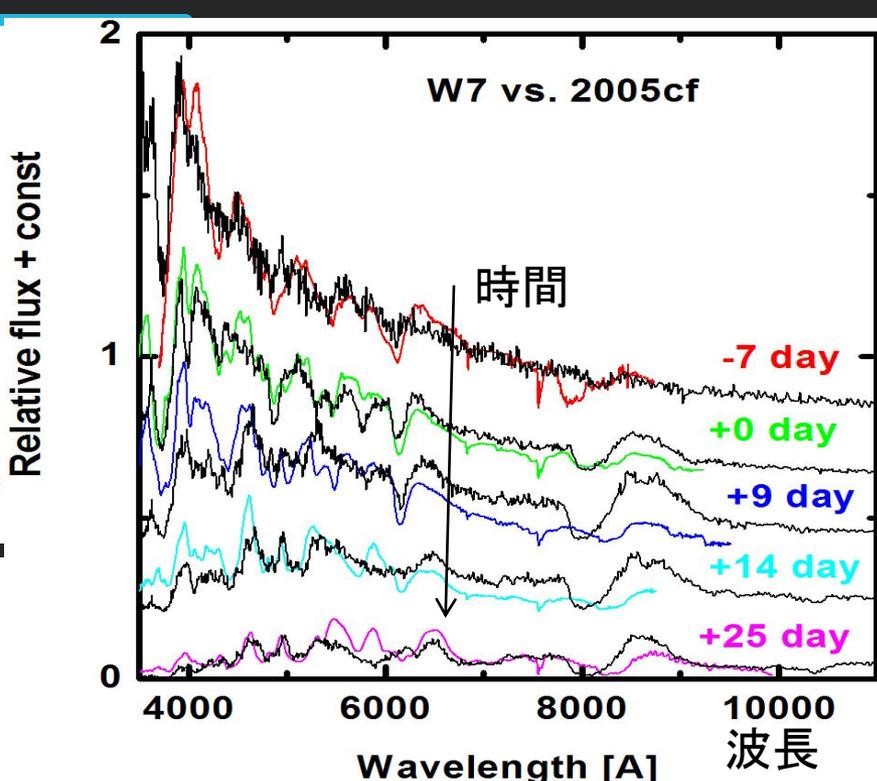
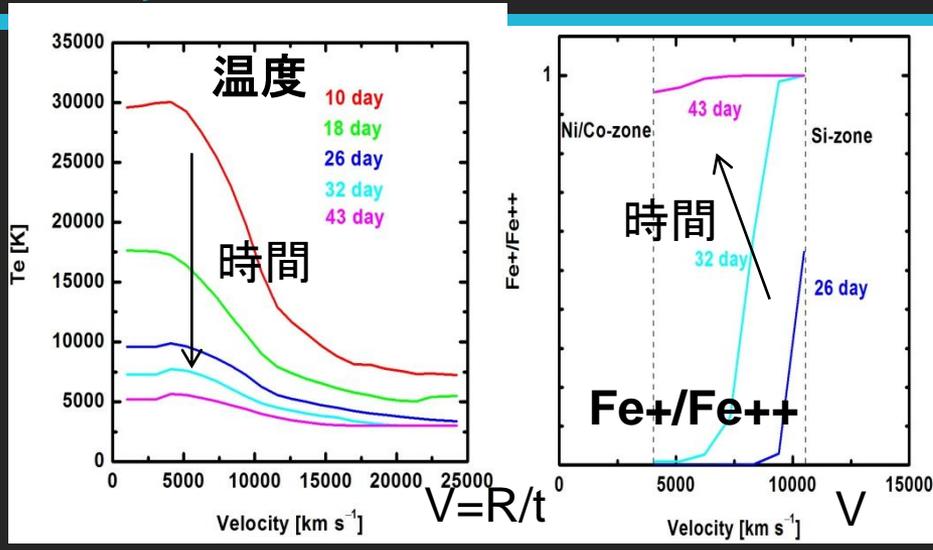
モンテカルロ法による輻射輸送



計算手順 (time-dependent)

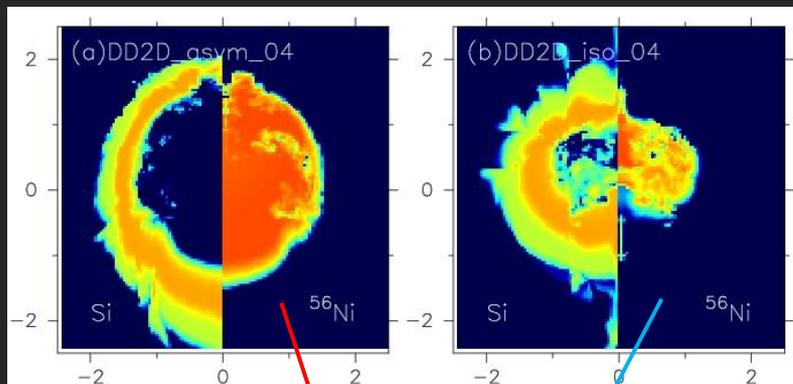


計算例: 1D Ia型超新星モデル(W7)



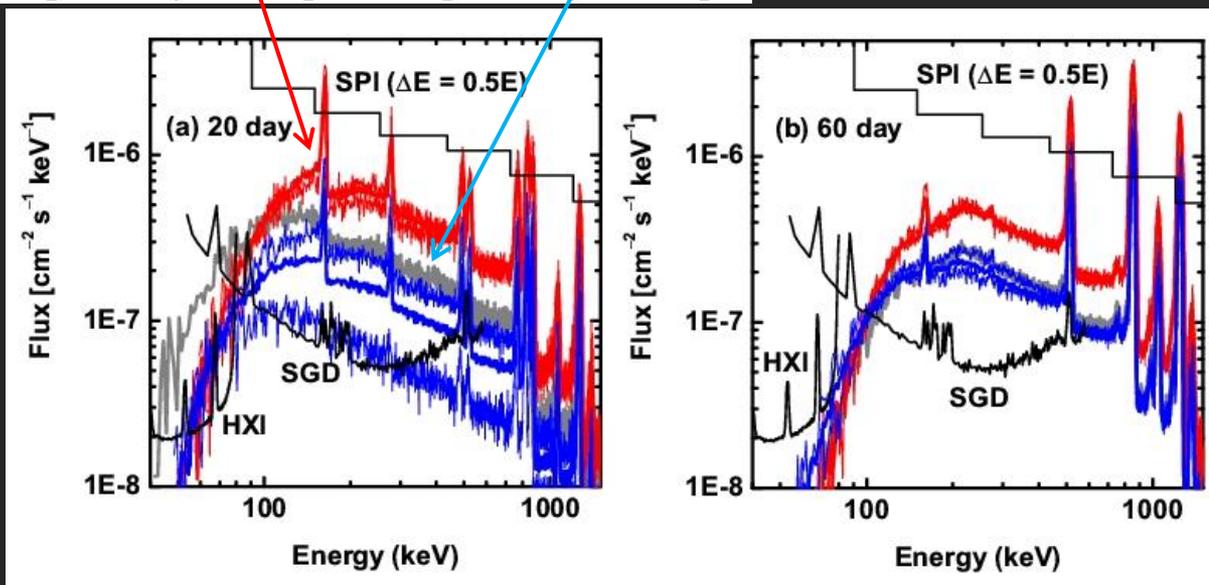
一次元球対称
 ~ 0.5 M line transitions (H - Zn)
 ~ 10⁷ photons per iteration
 48 cpus (~ 2000 cpu hrs)

計算例: 2D Ia型超新星モデル



KM, Terada, Kasen+, submitted.

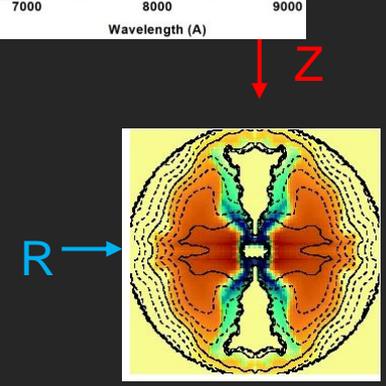
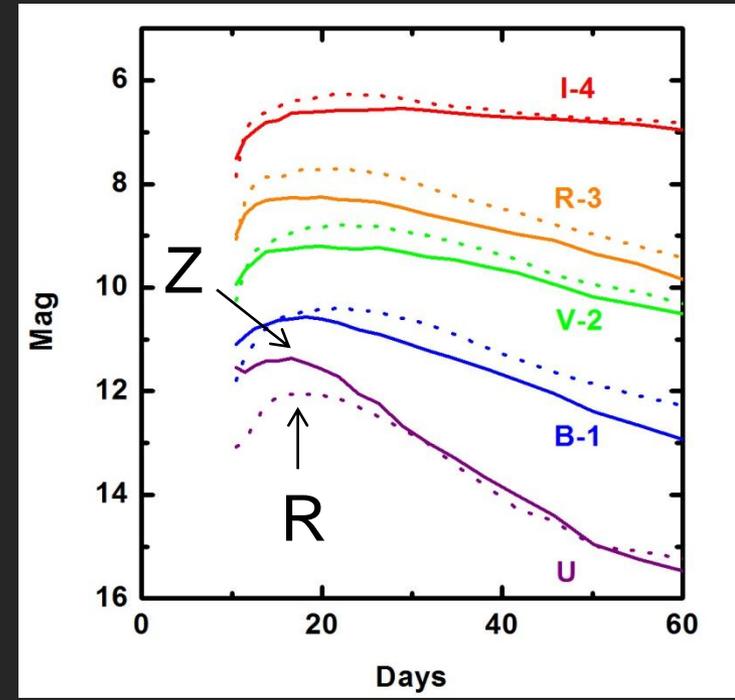
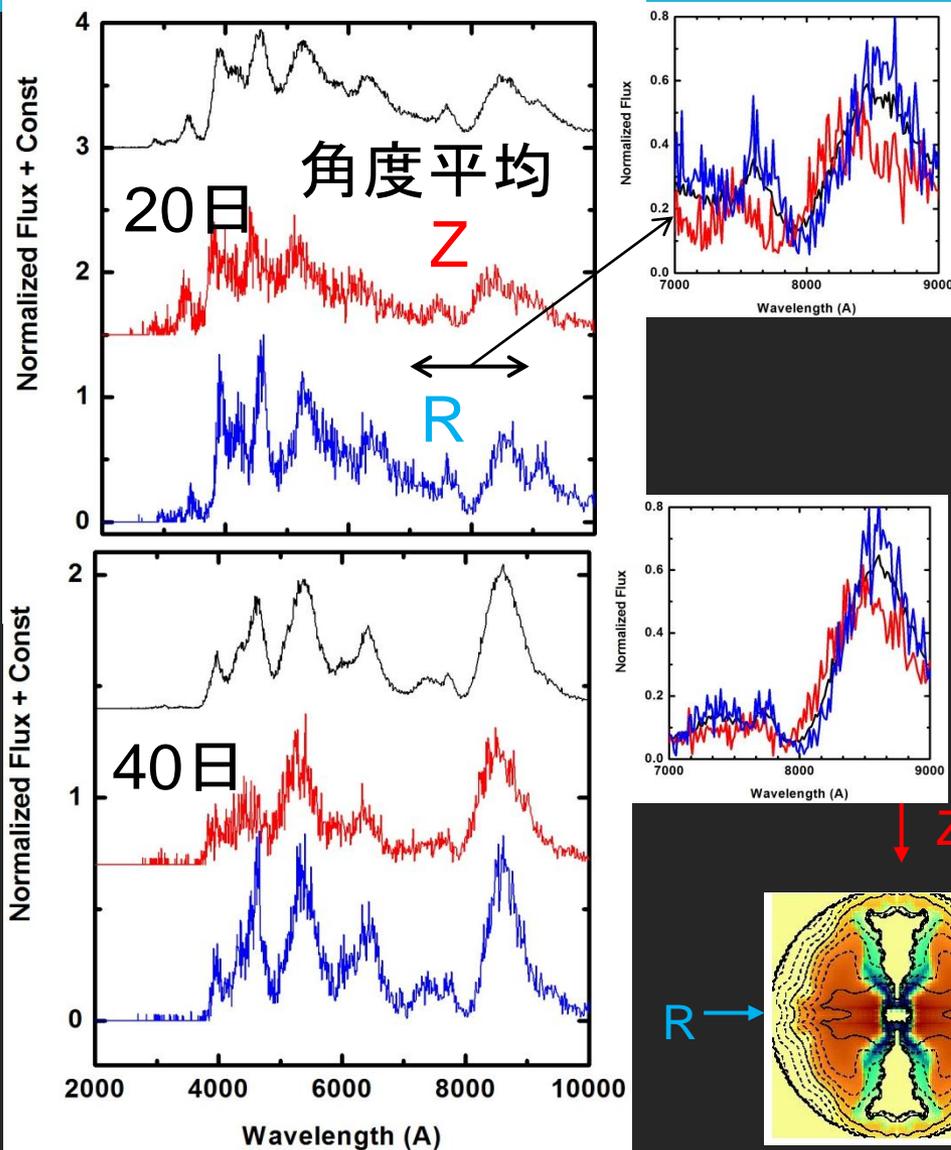
高エネルギー放射
(可視は今後)



モデル@10Mpc

Astro-HやNuStarで検出可能。

計算例: 2D非対称Ic型超新星モデル



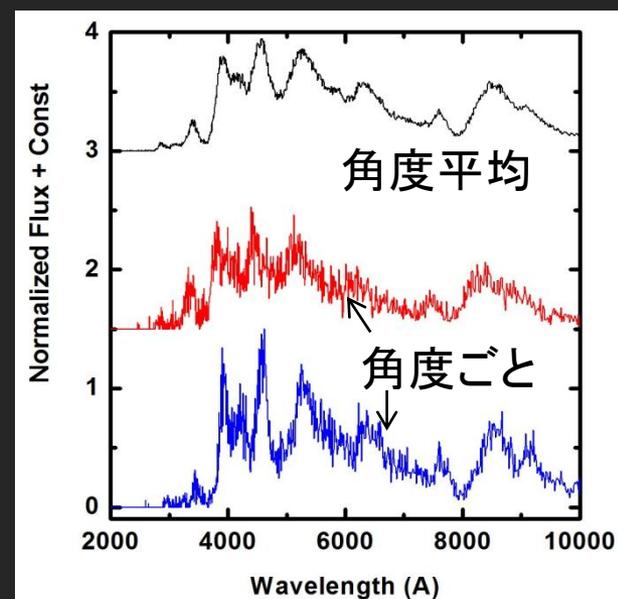
二次元軸対称
 ~ 10^7 photons per iteration
 モデル空間 40×40
 放射は角度方向20ビン
 48 cpus (~ 2000 cpu hrs)

今後の応用例

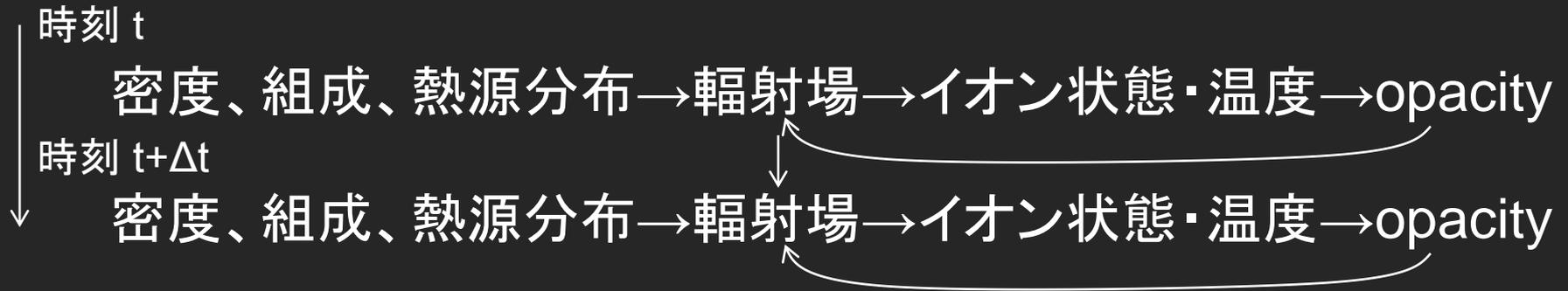
- II型超新星（巨星、水素外層）。
 - 熱源 = 爆発時の熱エネルギー。
 - Recombination wave \Rightarrow opacity の過程が重要。
 - II型 vs. Ibc型。親星、非対称性？
- “Post” shock Breakout @ 1日 – 2週間。
 - 熱源 = 爆発時の熱エネルギー。
 - 光球を仮定できない（光球外部に熱源）。
 - 親星外層部の情報。親星の特定。

今後の物理過程拡張の可能性

- 偏光 (level 1)。
- LTE \Rightarrow NLTE (level 2)。
 - いくつかの元素について詳細バランスを解く。
 - 非熱的高エネルギー電子の影響。
- 輻射流体 (level 3)。
- 計算時間短縮。
 - 光学的に厚い領域に近似を入れる? (検討中)例: 今回の計算... 1D/2D: 2000 cpu hrs
(角度ごとのスペクトルは粗い)
2D、角度ごとのスペクトルの詳細: 40,000 cpu hrs
3D (角度 20×20): 800,000 cpu hrs...



超新星以外の問題への応用



- 輻射計算の基本部分は一般的→様々な問題に適用可能
(注:ただしNLTEが本質的な問題も多い)。
- Opacityは任意のもの(組成、密度、温度依存)が実装可能。
 - 現状: $X - \gamma$ = 対生成、コンプトン散乱、光電吸収。
NIR – UV = 原子(b-b, b-f, f-f)、トムソン散乱。
- 超新星以外への問題にも適用可能。

まとめ

- モンテカルロ法による多次元超新星輻射輸送の現状。
 - 多次元(1-3D)、多波長(γ -NIR)、時間依存。
- 爆発モデル⇒観測量。
 - 観測と比較したい爆発モデルはありませんか？
- (特に)3Dは大規模計算機が必要。
 - 求、計算資源。
- 物理過程のupdateは比較的容易。
 - 今後、様々な観測に向けた計算を。
- 超新星以外にも様々な天体現象に応用可能(という期待)。
 - 提案募集。