

Developing a long time supernova simulation framework

森正光、Roger Wendell、諏訪雄大^A、中里健一郎^B、住吉光介^C、小汐由介^D
京大理、京産大理^A、九大基幹^B、沼津高専^C、岡山大理^D

発表の流れ

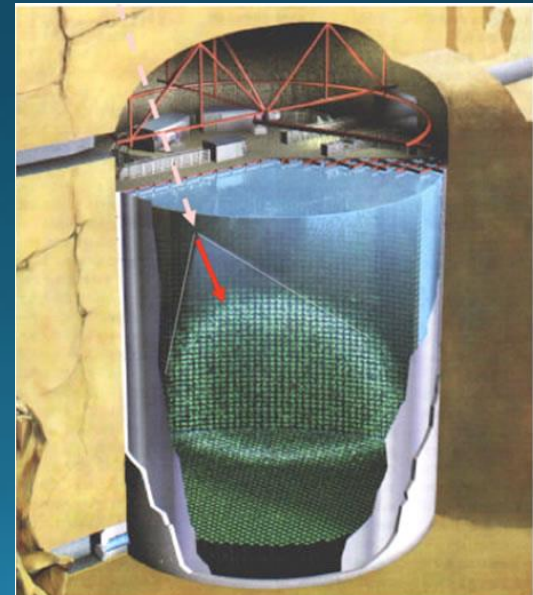
1. スーパーカミオカンデについて
2. 超新星爆発解析の現状の問題点
 - 理論計算がSN1987Aのニュートリノデータに追いついていない
3. 開発の現状
 - 超新星爆発計算の統合フレームワーク
 - 爆発の1次元シミュレーション
4. まとめ

発表の流れ

1. スーパーカミオカンデについて
2. 超新星爆発解析の現状の問題点
 - 理論計算がSN1987Aのニュートリノデータに追いついていない
3. 開発の現状
 - 超新星爆発計算の統合フレームワーク
 - 爆発の1次元シミュレーション
4. まとめ

スーパーカミオカンデ (SK)

- 岐阜県神岡町にある水チェレンコフ型の検出器
 - 直径39.3 m 高さ 41.4 mのタンクに13,000本(ID:11,000 OD:2,000)のPMTがついている。
 - Fiducial Volumeは22.5 kton(カミオカンデと比べて約20倍)
- 陽子崩壊探索やニュートリノ観測を行っている。
- ニュートリノによる超新星爆発の観測を行っている。



発表の流れ

1. スーパーカミオカンデについて
2. 超新星爆発解析の現状の問題点
 - 理論計算がSN1987Aのニュートリノデータに追いついていない
3. 開発の現状
 - 超新星爆発計算の統合フレームワーク
 - 爆発の1次元シミュレーション
4. まとめ

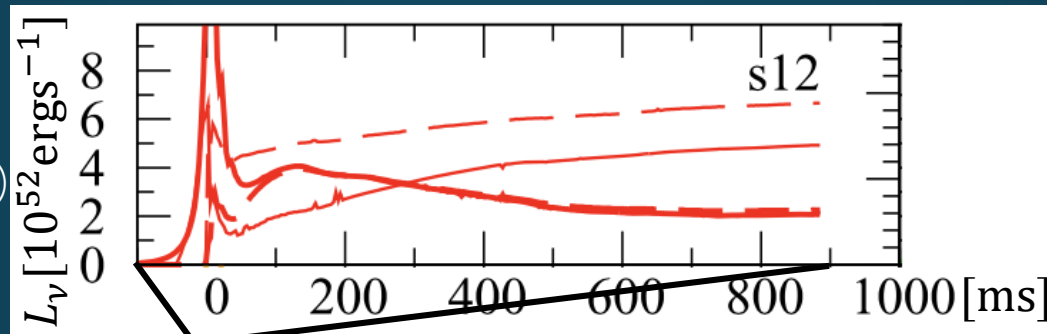
発表の流れ

1. スーパーカミオカンデについて
2. 超新星爆発解析の現状の問題点
 - 理論計算がSN1987Aのニュートリノデータに追いついていない
3. 開発の現状
 - 超新星爆発計算の統合フレームワーク
 - 爆発の1次元シミュレーション
4. まとめ

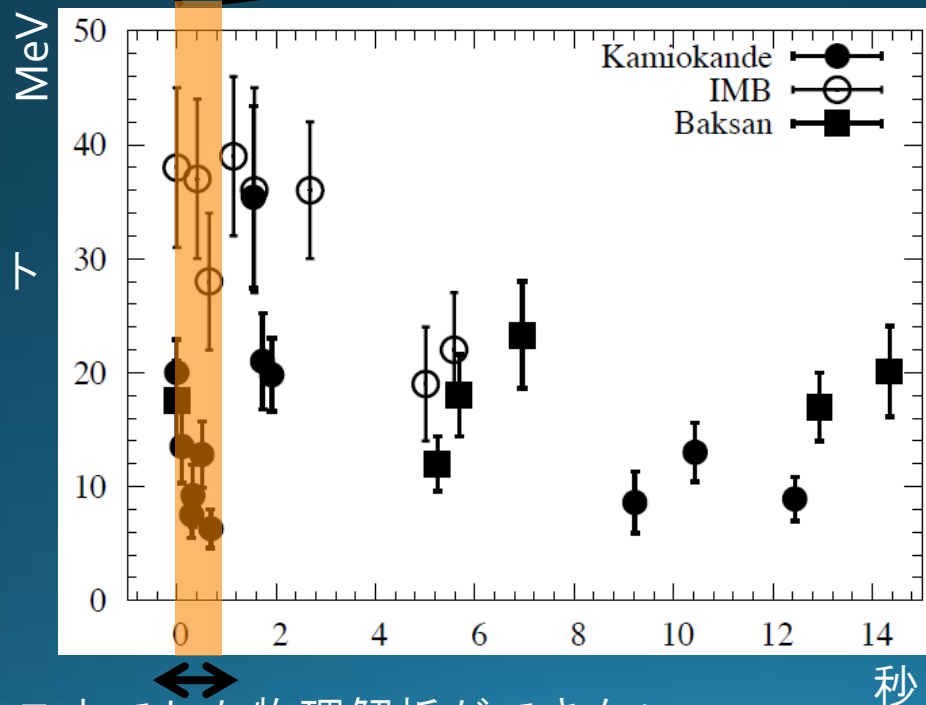
超新星爆発解析の問題点

- 超新星爆発のシミュレーションはほとんどが爆発するかしないかの1秒以内の計算

数値計算の例
Suwa et al. (2016)



SN1987Aからの
ニュートリノイベント

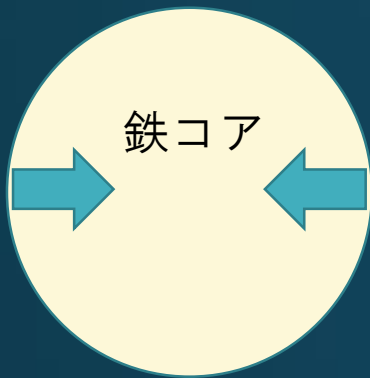


ここまでしか物理解析ができない

注：爆発後のみを取り
扱った計算もあるが、
不十分

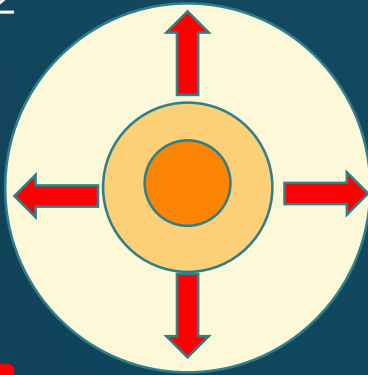
超新星爆発の時間発展

1



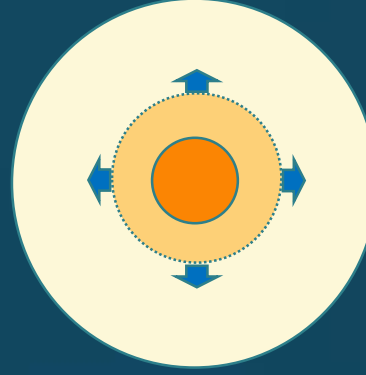
電子捕獲反応により
重力崩壊の開始

2



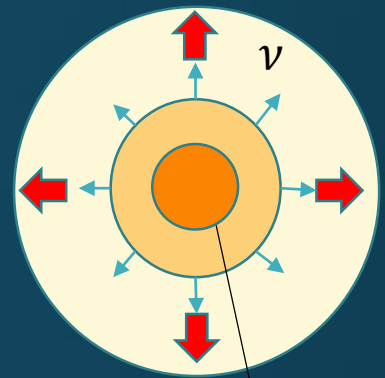
衝撃波の発生

3



衝撃波の停滞

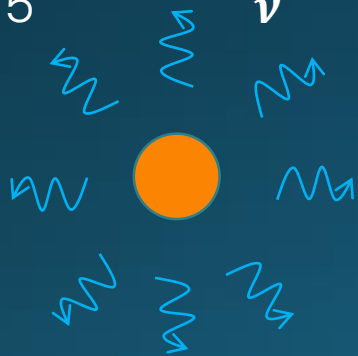
4



衝撃波の復活

原始中性子星

5



原始中性子星の冷却

爆発にはニュートリノが関わっている

ここまで1秒程度

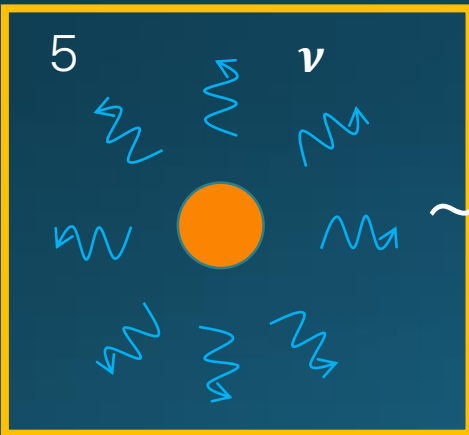
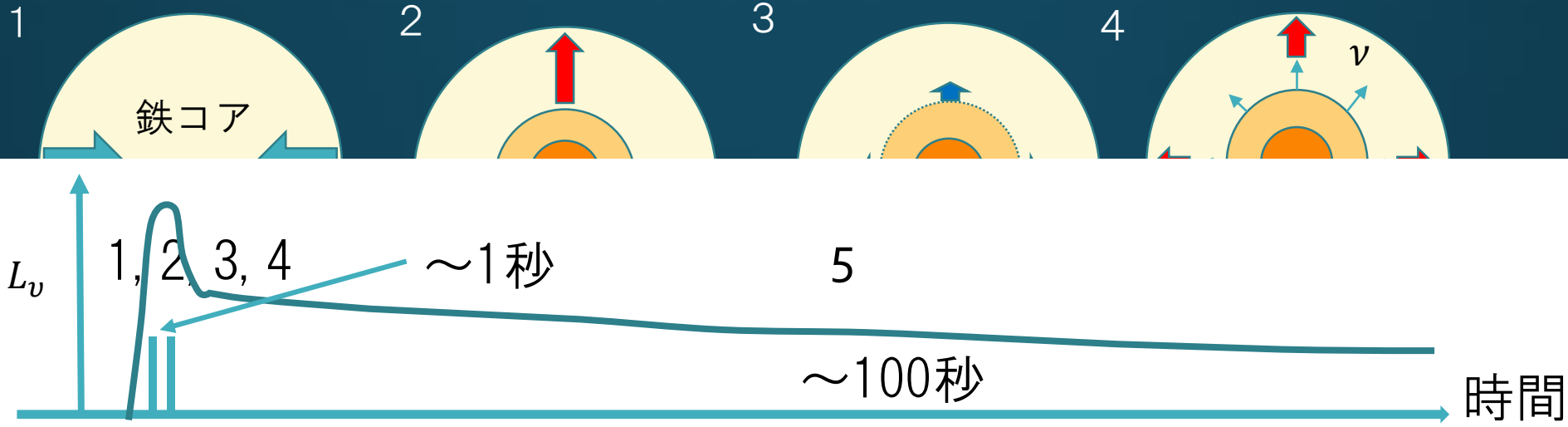
5のフェーズが100秒以上続き、
全エネルギーの半分以上を開放する。

6



衝撃波が外層に伝
わると光学観測に
よる超新星爆発

超新星爆発の時間発展



原始中性子星の冷却

爆発にはニュートリノが関わっている

~ 1 秒

原始中性子星の冷却を計算することが観測と理論を突き合わせるためには必要不可欠



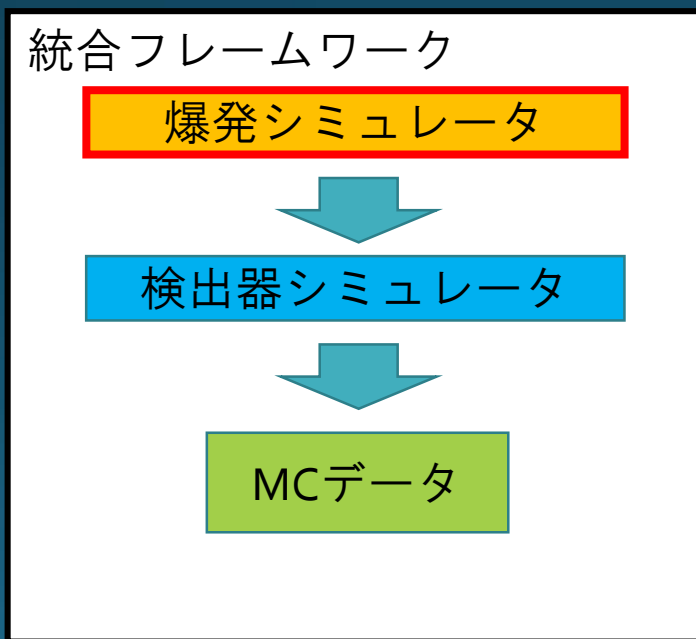
衝撃波が外層に伝わると光学観測による超新星爆発

発表の流れ

1. スーパーカミオカンデについて
2. 超新星爆発について
 - SN1987A
3. 超新星爆発解析の現状の問題点
 - 理論計算がSN1987Aのニュートリノデータに追いついていない
4. 開発の現状
 - 超新星爆発計算の統合フレームワーク
 - 爆発の1次元シミュレーション
5. まとめ

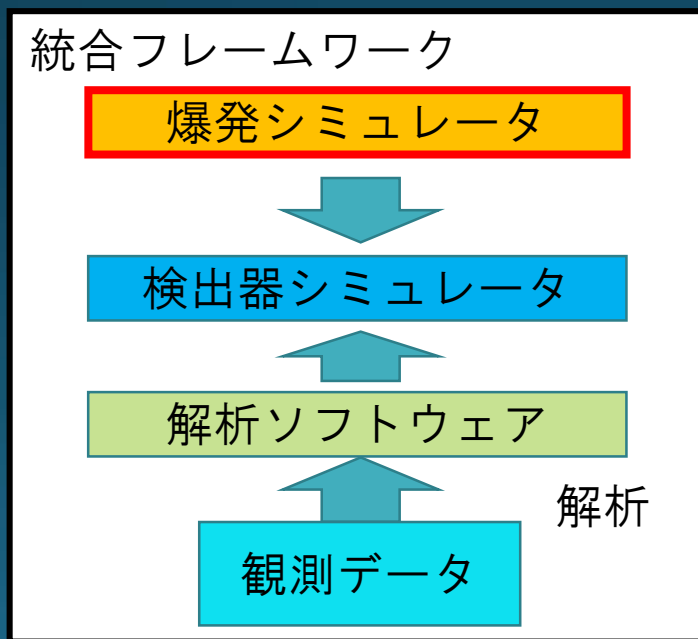
超新星爆発シミュレータ開発

- 星の爆発から原始中性子星の冷却さらにSKでの観測までをすべて計算する統合フレームワークを開発する。
- 特に1秒以降の長期間のニュートリノ放出に焦点を当てる
- 様々なモデルや初期条件でシミュレーションを行う。
- SKで観測されるシグナルから超新星爆発について何が分かるかまで評価



超新星爆発シミュレータ開発

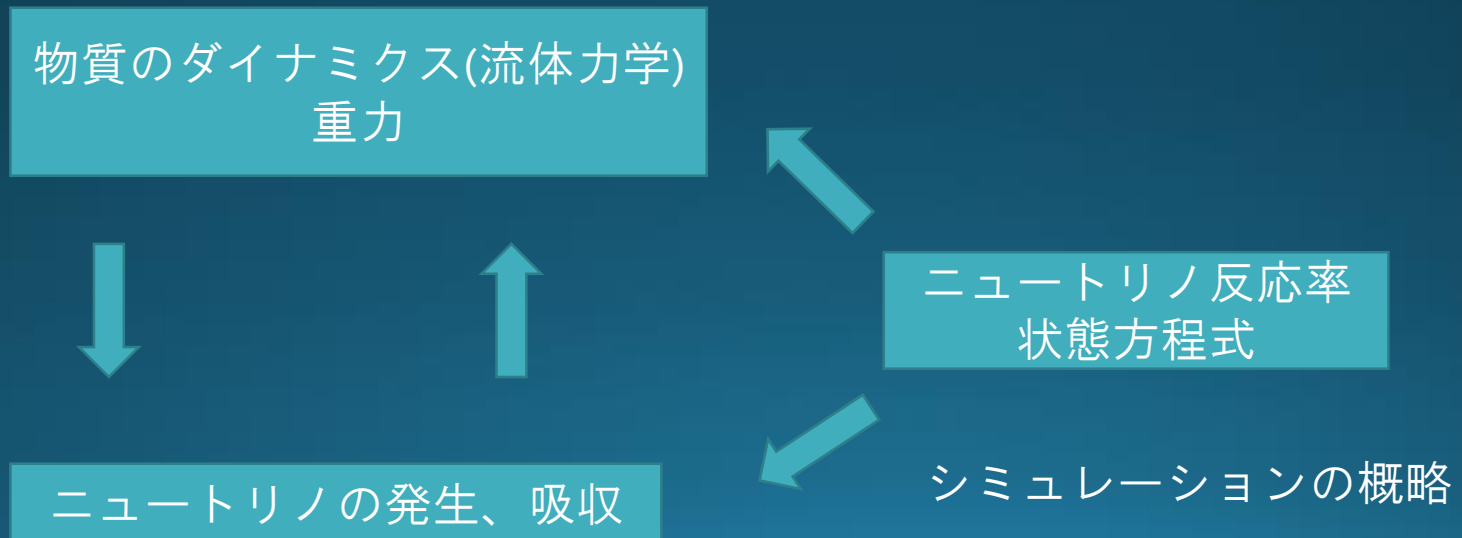
- 星の爆発から原始中性子星の冷却さらにSKでの観測までをすべて計算する統合フレームワークを開発する。
- 特に1秒以降の長期間のニュートリノ放出に焦点を当てる
- 様々なモデルや初期条件でシミュレーションを行う。
- SKで観測されるシグナルから超新星爆発について何が分かるかまで評価



観測出来たら

1次元シミュレーション

- 1次元球対称モデルで超新星爆発のシミュレーションをした。
- 使用コード
 - GR1Dv2 (公開コード: <http://stellarcollapse.org>)
 - O' Connor, ApJS 2015
- 親星
 - 太陽質量の9.6倍
 - Woosley and Heger, ApJS 2015
 - 1次元計算で爆発するモデル



なぜ1次元か？

- 多次元計算では計算コストが大きく長時間の計算ができない。
- 本研究では多くのモデルを比較することを目的としている。
- 今回興味のある 1 秒以降では多次元効果はあまり効かない

次元	グリッド数
1D	256
2D	65, 536
3D	16, 777, 216

1 自由度当たり256グリッドに分けた場合の計算コストの比較

1D



デスクトップで数日
<http://pr.fujitsu.com/jp/>

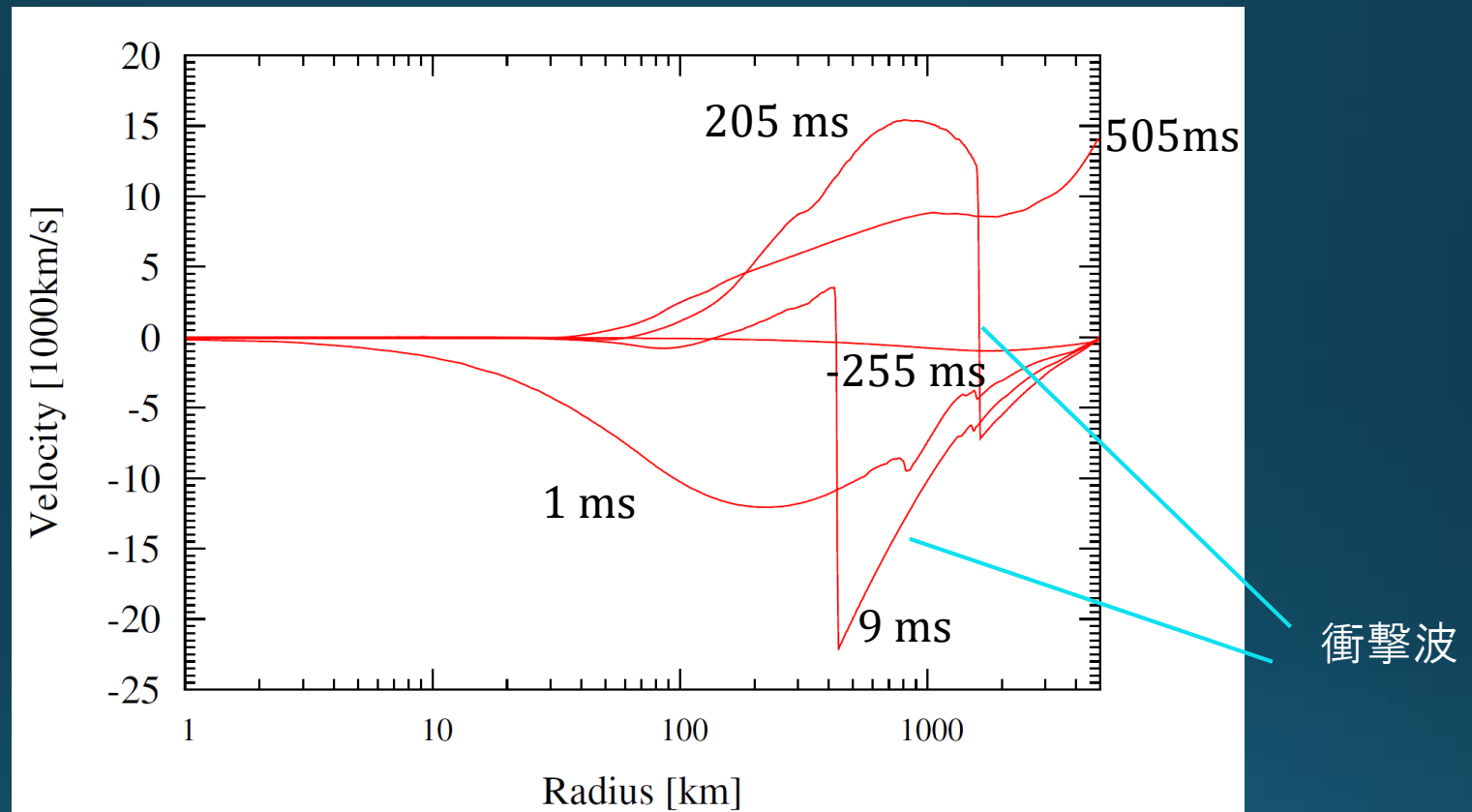
VS



京で数ヶ月

[https://ja.wikipedia.org/wiki/京\(スーパーコンピュータ\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/京(スーパーコンピュータ))

シミュレーション結果



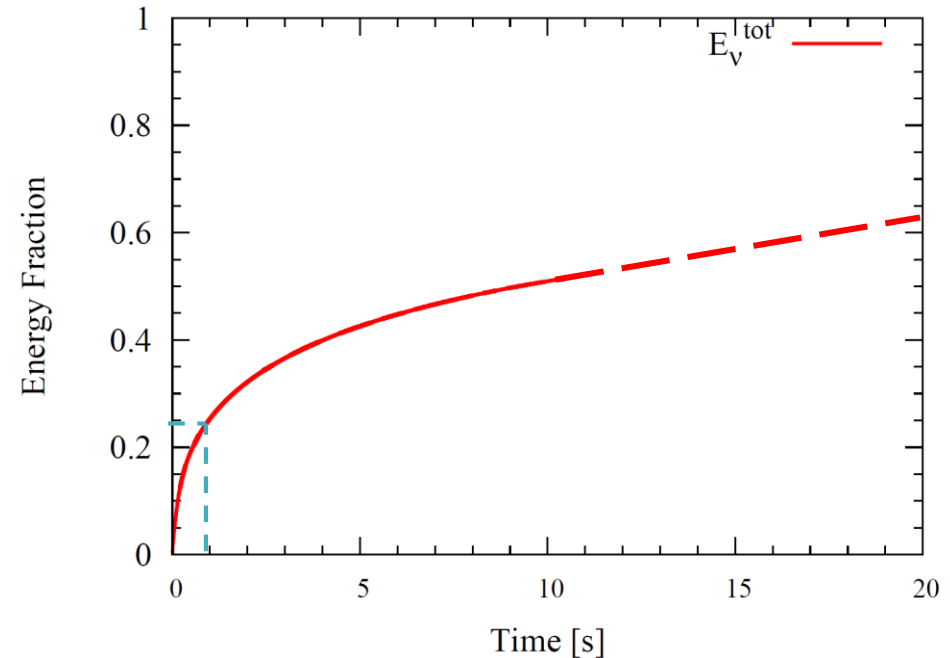
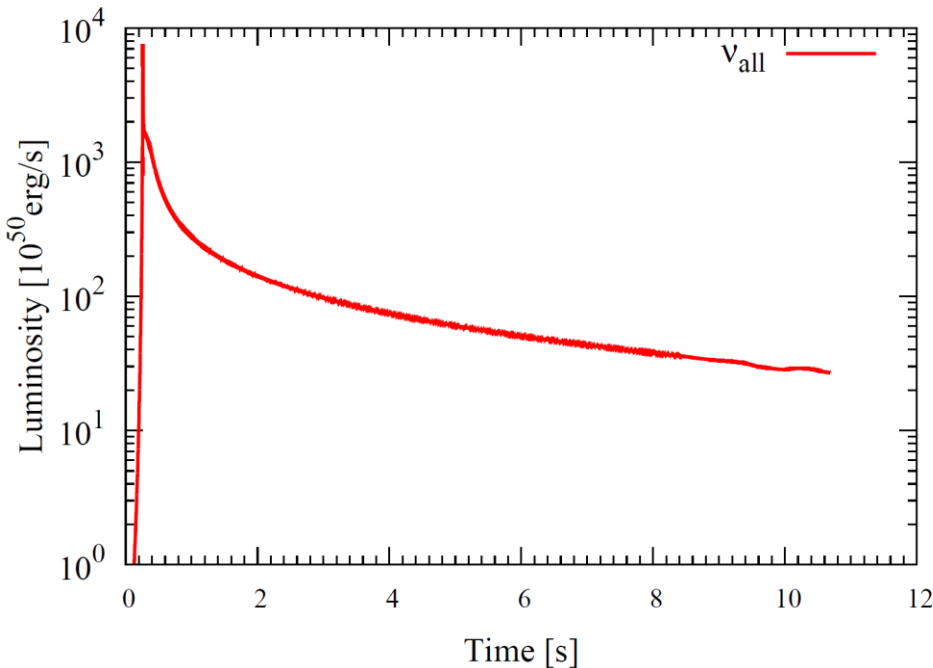
- バウンスから158 msで爆発

ニュートリノルミノシティ

放出されたニュートリノエネルギーの割合

$$\frac{E_{\nu}^{\text{tot}}(t)}{E_{\nu}^{\text{tot}}(\infty)} \text{ で規格化}$$

ニュートリノルミノシティ



- 現在10秒までのニュートリノの計算ができている。
- 1秒時点での放出されたエネルギーは全エネルギーの1/4以下ではない。

発表の流れ

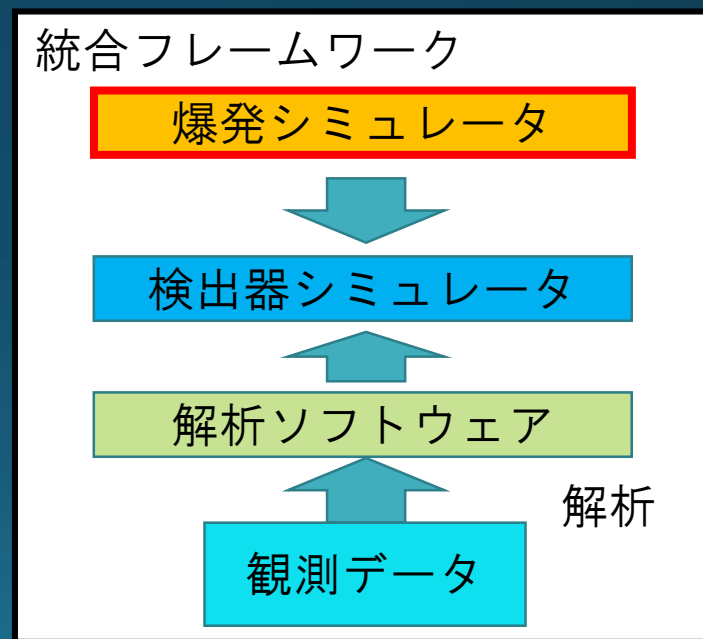
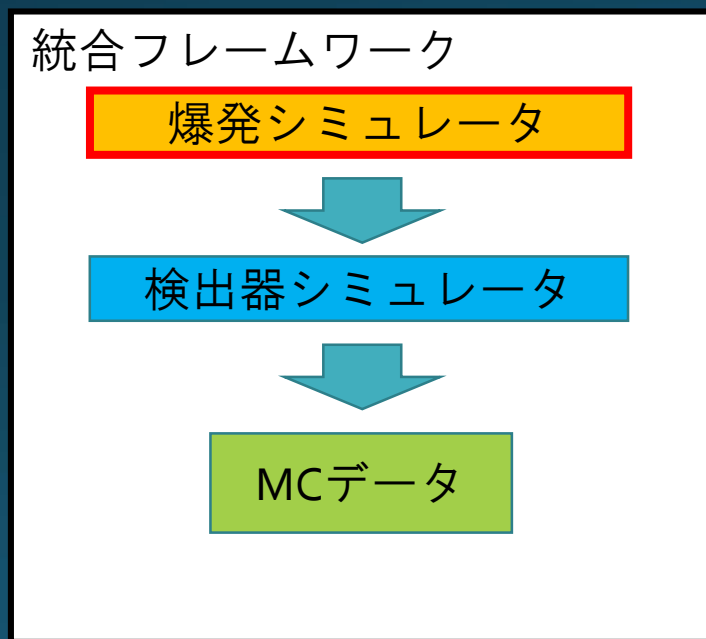
1. スーパーカミオカンデについて
2. 超新星爆発について
 - SN1987A
3. 超新星爆発解析の現状の問題点
 - 理論計算がSN1987Aのニュートリノデータに追いついていない
4. 開発の現状
 - 超新星爆発計算の統合フレームワーク
 - 爆発の1次元シミュレーション
5. まとめ

まとめ

- 超新星爆発からの長時間のニュートリノ放出の系統的な計算はない。
- 実際のニュートリノ放出は10秒以上続くがそのほとんどで物理解析ができない。
- 爆発から観測までを計算するシミュレータを開発する。
- 1次元モデルを使い爆発に成功して、10秒まで計算した。
- 観測される全時間の計算を行う。

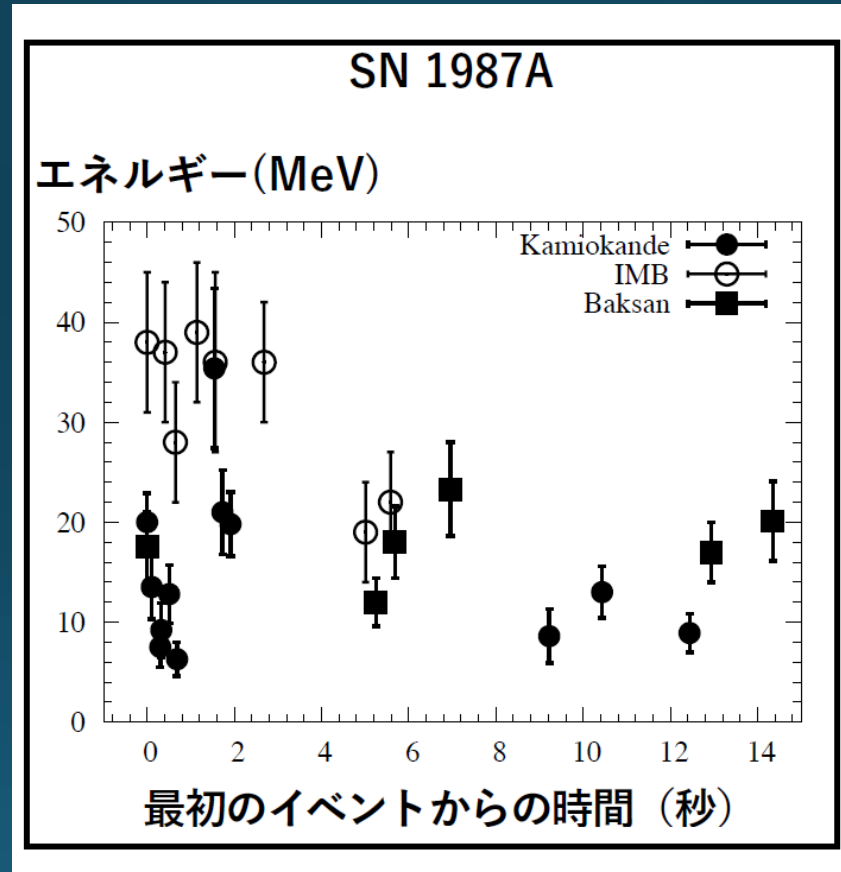
今後の方針

- 20秒以上の計算を目指す。
- 様々な条件での計算
- フレームワークのほかの部分を開発する。



ニュートリノによる超新星爆発観測 (SN1987A)

- 1987年にSKの前身カミオカンデで初めて超新星爆発からのニュートリノが観測された。



SN1987Aからのニュートリノ