



Rheology-based sea ice dynamics: from the fluid-like to the state-of-the-art solid-like brittle approach

Niccolò Zanotti¹

Relatore: Prof. Alberto Carrasi¹

Correlatore: Dr. Ivo Pasmans²

¹Dipartimento di Fisica ed Astronomia, Università di Bologna, IT

²National Centre for Earth Observation, University of Reading, UK

Overview

- 1 Introduzione
 - Il ghiaccio marino
 - L'importanza del ghiaccio marino
- 2 Modellizzare la dinamica del ghiaccio
 - Un modello completo
- 3 La reologia del ghiaccio marino
 - Generalità
 - Modelli reologici fluid-like
- 4 Un nuovo approccio
 - Un sistema con deformazione multifrattale
 - Modelli reologici solid-like
- 5 Conclusioni

1. Introduzione

Cos'è il ghiaccio marino?

- Sottile copertura di ghiaccio sulle superfici oceaniche
- Struttura:
 - **Banchi irregolari** ('ice floes')



Cos'è il ghiaccio marino?

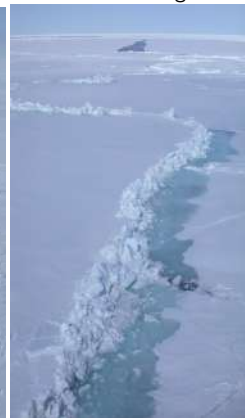
- Sottile copertura di ghiaccio sulle superfici oceaniche
- Struttura:
 - **Banchi irregolari** ('ice floes')
 - Aperture ('leads') e zone di alta pressione ('pressure ridges') → LKFs

Lead



Credits: J. MacGregor / NASA

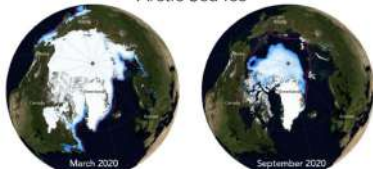
Pressure ridge



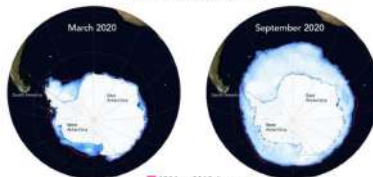
Credits: H. Lange/ NOAA

Dove si trova?

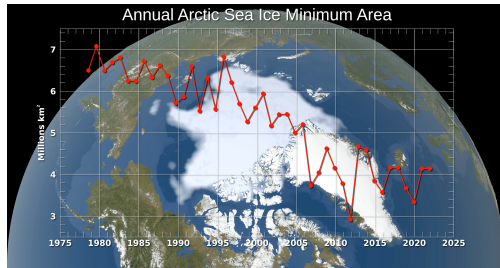
Arctic Sea Ice



Antarctic Sea Ice



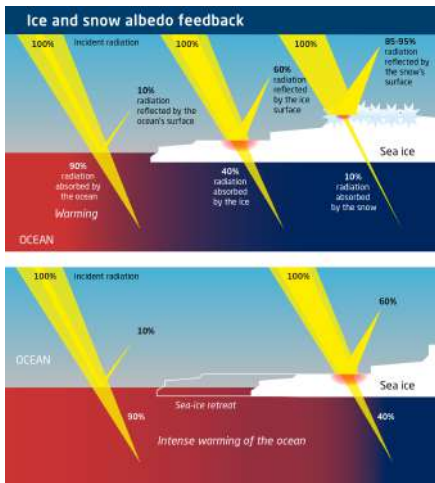
National Snow and Ice Data Center



Data source: Satellite observations.

Credit: NASA Scientific Visualization Studio

Una componente del sistema climatico



- Contribuisce alla regolazione climatica **regionale** e **globale**:
 - Attraverso il feedback positivo ice-albedo (amplificazione polare)
 - Influenzando circolazioni oceaniche su scala globale, e.g. la circolazione termoalina
 - Impatta la meteorologia: alterazione di precipitazioni e traiettoria di perturbazioni
- Impatta le attività marittime: nuove rotte accessibili per le navi rompighiaccio nell'Artico

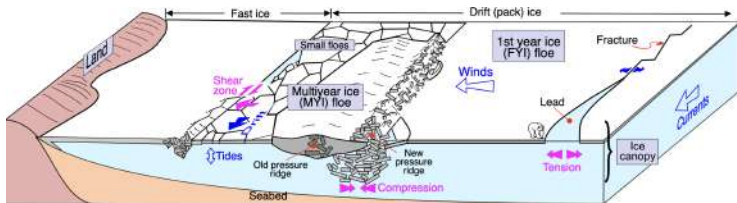
Credit: Sea ice portal (Das Meereisportal.de), Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research

2. Modellizzare la dinamica del ghiaccio

Una dinamica multi-scala

- **Dinamica** del ghiaccio marino: moto (drift) e la deformazione
 - Fortemente accoppiata con la dinamica atmosferica e oceanica

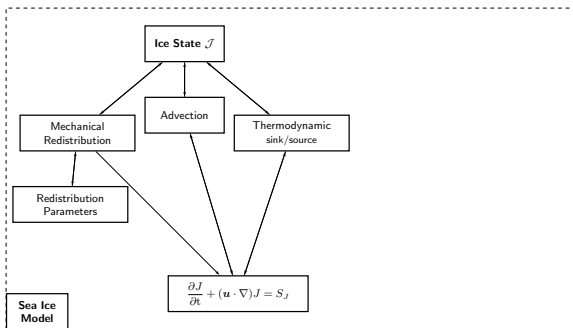
- Dinamica multi-scala caratterizzata da una deformazione
 - Eterogenea nello spazio
 - Intermittente nel tempo
- Goal: Modello **2D, continuo** che riproduca la dinamica osservata alle varie scale



Credit: Lusilier, wikipedia

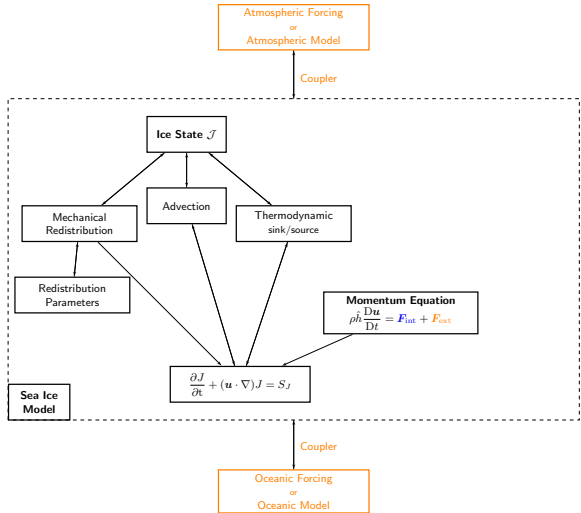
Le componenti fisiche di un modello dinamico

- Variabili prognostiche, soddisfacenti un'eq. di conservazione/trasporto:
- \mathbf{u} : la velocità di drift
- S_J : sinks/sources meccanici + termodinamici.
- La **concentrazione** di ghiaccio per unità d'area A , deve soddisfare $0 \leq A \leq 1$
→ schema di redistribuzione meccanica



Le componenti fisiche di un modello dinamico

- L'eq. del moto è data dal bilancio del momento lineare
- Integrata verticalmente
- $\hat{h} \rightarrow$ spessore medio
- h volume per unità d'area
- F_{ext} contiene:
 - τ_a, τ_w stress applicato sulla superficie da atmosfera, oceano
 - La componente orizzontale di Coriolis: $-\rho \hat{h} f_c \hat{k} \times \mathbf{u}$
 - La forza dovuta al gradiente dell'elevazione: $-\rho h g \nabla H$



Le componenti fisiche di un modello dinamico

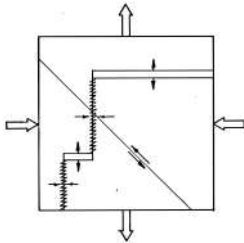
- Chiusura equazioni del modello:

$$\sigma = \sigma(\mathcal{J}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}), \text{ dove}$$

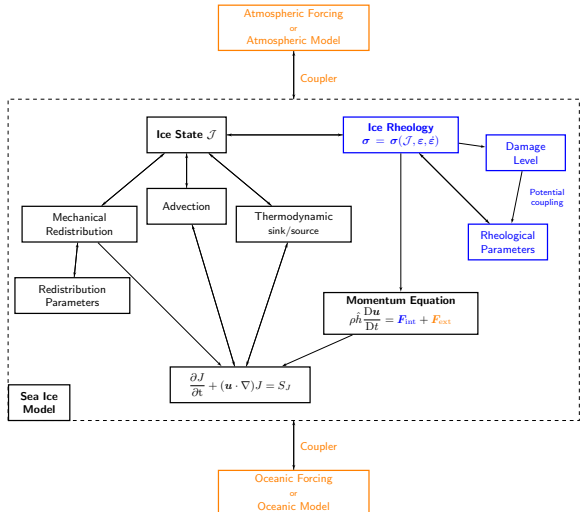
- σ è lo stress interno
- $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ la deformazione e il suo rate

- Forze interne:

$$F_{int} = \nabla \cdot (h\sigma)$$



Possibile deformazione di un elemento di ghiaccio (pure shear).
 From Coon et al. (1974)

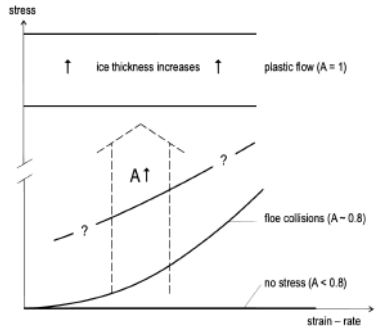


3. La reologia del ghiaccio marino

Reologia del ghiaccio

- **Reologia:** studia la deformazione e materiali solidi e liquidi.
 - Parametrizza le interazioni meccaniche all'interno del ghiaccio (*grid e sub-grid scale*)
 - Fornisce un modello costitutivo:
 $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, \mathcal{J}) \rightarrow$ altamente non-lineare!
- σ non trascurabile quando il ghiaccio è molto compatto

- Combinazione di comportamenti **solid-like** (elastico, plastico, fragile) e **fluid-like** (viscoso, non Newtoniano)



Modelli fluid-like

- Primi modelli: Reologia **viscosa** ($\sigma = \eta \dot{\epsilon}'$) \rightarrow fallimentare
- Modellizzazione **plastica**:
 - Yield curve: $F(\sigma_I, \sigma_{II}; \mathcal{J}) = 0$ (sforzo critico/subcritico?)
 - Flow rule (come avviene la deformazione plastica)

Reologia **Elastico-plastica (EP)**

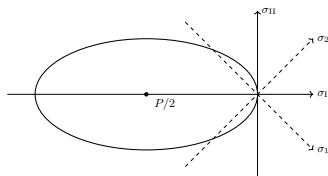
- Subcritico: lineare elastico
- Modello costitutivo:
$$\sigma = EK : \epsilon$$
- Yield curve con tear-drop shape

Reologia **Visco-plastica (VP)**

- Subcritico: viscoso lineare
- Modello costitutivo:

$$\sigma = 2\eta \dot{\epsilon}' + [\zeta - \eta] \text{tr } \dot{\epsilon}' \mathbf{I} - \frac{P}{2} \mathbf{I}$$

- Yield curve ellittica:



Modelli fluid-like

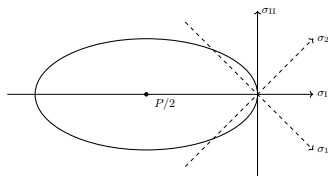
- Primi modelli: Reologia **viscosa** ($\sigma = \eta \dot{\epsilon}'$) \rightarrow fallimentare
- Modellizzazione **plastica**:
 - Yield curve: $F(\sigma_I, \sigma_{II}; \mathcal{J}) = 0$ (sforzo critico/subcritico?)
 - Flow rule (come avviene la deformazione plastica)

Reologia **Visco-plastica (VP)**

- Subcritico: viscoso lineare
- Modello costitutivo:

$$\sigma = 2\eta \dot{\epsilon}' + [\zeta - \eta] \text{tr } \dot{\epsilon}' \mathbf{I} - \frac{P}{2} \mathbf{I}$$

- Yield curve ellittica:



- La reologia VP è quella correntemente utilizzata nei modelli operativi di sea ice forecasting!
- Descrive bene la deformazione su larga scala (> 100 km)
- Inadeguata alle scale minori!

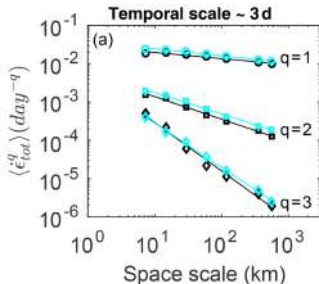
4. Un nuovo approccio

Analisi di scala

Il ghiaccio è un sistema **multifrattale**, ovvero la sua deformazione è:

- **Eterogenea**

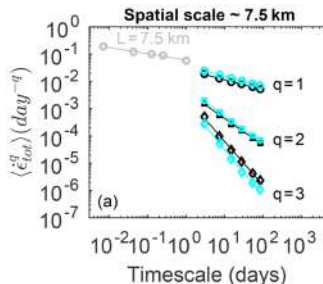
$$\langle \dot{\epsilon}_{tot}^q \rangle \sim L^{-\beta(q)}$$



Taken from: Rampal et al. (2019)

- **Intermittente**

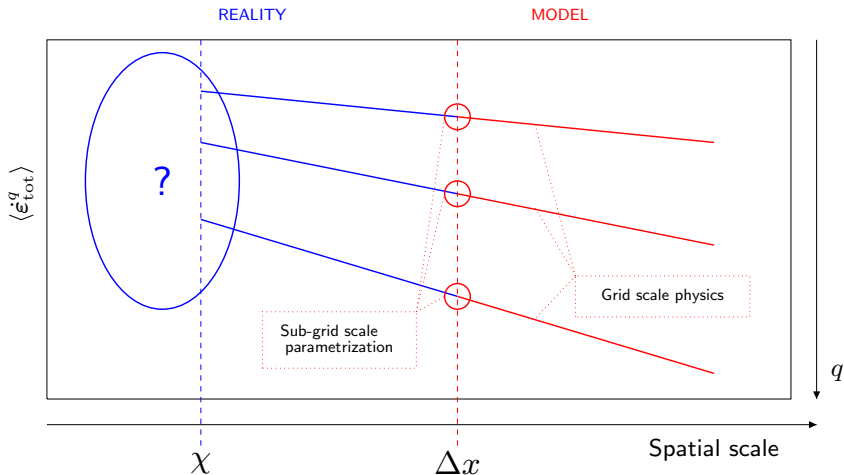
$$\langle \dot{\epsilon}_{tot}^q \rangle \sim T^{-\alpha(q)}$$



Taken from: Rampal et al. (2019)

- Analisi dei primi momenti della distribuzione $P(\dot{\epsilon}_{tot})$
- q è l'ordine del momento

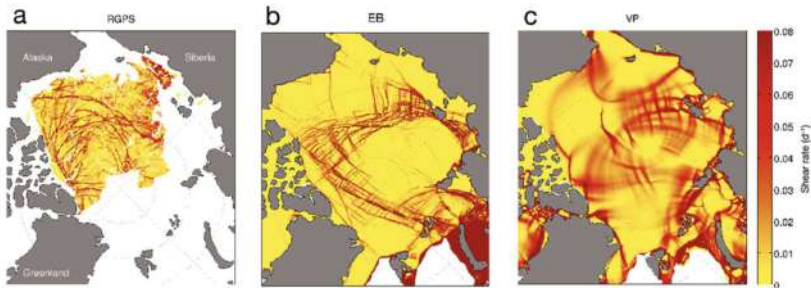
Analisi di scala - Un nuovo paradigma



L'approccio elasto-brittle

- Approccio **elasto-brittle** basato su :
 - Meccanismo di danno progressivo come parametrizzazione sub-grid scale del rilassamento dello stress nel ghiaccio → Interazioni elastiche long-range
- Applicato con successo per la crosta terrestre
- Reologia **Elasto-Brittle (EB)**; Girard et al. 2011)
- Modello costitutivo:

$$\frac{D\sigma}{Dt} = EK : \dot{\epsilon} - \frac{\dot{d}}{1-d}\sigma$$

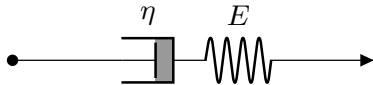


Taken from: Girard et al. (2011)

Reologie MEB, BBM

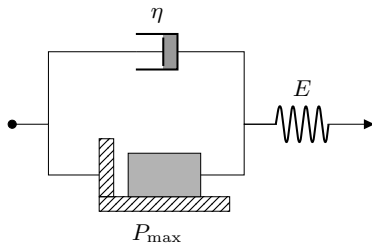
- Reologia **Maxwell-Elasto-Brittle** (**MEB**; Dansereau 2016)
- Deformazioni permanenti per ghiaccio molto danneggiato → flow con viscosità apparente η , tempo di rilassamento λ
- Modello costitutivo:

$$\frac{D\sigma}{Dt} = E(\mathbf{K} : \dot{\epsilon}) - \frac{1}{\lambda}\sigma + \frac{\dot{E}}{E}\sigma$$



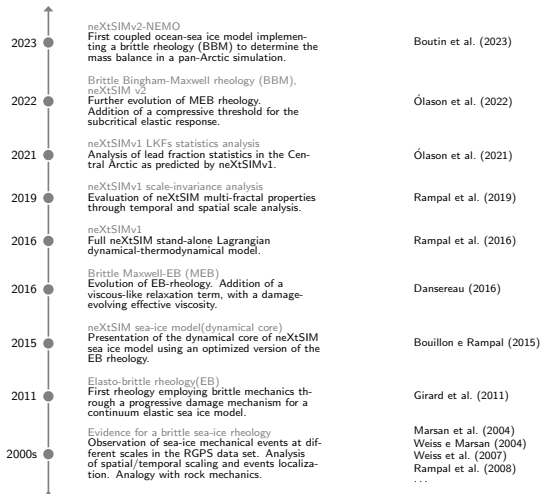
- Reologia **Brittle-Bingham-Maxwell** (**BBM**; Ólason et al. 2022)
- Inclusione di una threshold \tilde{P} per deformazioni permanenti → adatto a simulare ridging
- Modello costitutivo:

$$\frac{D\sigma}{Dt} = E(\mathbf{K} : \dot{\epsilon}) - \frac{\sigma}{\lambda} \left(1 + \tilde{P} + \lambda \frac{\dot{d}}{1-d} \right)$$



5. Conclusioni







Conclusioni & sviluppi futuri









- Reologie **solid-like**: catturano la proprietà dinamiche alle varie scale
- Studio interazioni ghiaccio-oceano e ghiaccio-atmosfera
- Goal: completa modellizzazione multiscala
- Quanto vale la scala χ ?

Grazie per l'attenzione

Bibliografia I

-  Bouillon, S. e P. Rampal (1 lug. 2015). «Presentation of the dynamical core of neXtSIM, a new sea ice model». In: *Ocean Modelling* 91, pp. 23–37.
-  Boutin, G. et al. (2023). «Arctic sea ice mass balance in a new coupled ice–ocean model using a brittle rheology framework». In: *The Cryosphere* 17.2, pp. 617–638.
-  Coon, M.D. et al. (1974). «Modeling the pack ice as an elastic-plastic material». In: *AIDJEX Bulletin* 24, pp. 1–105.
-  Dansereau, V. (2016). «A Maxwell-Elasto-Brittle model for the drift and deformation of sea ice». Tesi di dott. Grenoble, France: Université Grenoble Alpes.
-  Girard, L. et al. (2011). «A new modeling framework for sea-ice mechanics based on elasto-brittle rheology». In: *Annals of Glaciology* 52.57, pp. 123–132.
-  Marsan, D. et al. (ott. 2004). «Scale Dependence and Localization of the Deformation of Arctic Sea Ice». In: *Phys. Rev. Lett.* 93.17, p. 178501.

Bibliografia II

-  Ólason, E., P. Rampal e V. Dansereau (2021). «On the statistical properties of sea-ice lead fraction and heat fluxes in the Arctic». In: *The Cryosphere* 15.2, pp. 1053–1064.
-  Ólason, E. et al. (2022). «A New Brittle Rheology and Numerical Framework for Large-Scale Sea-Ice Models». In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 14.8.
-  Rampal, P. et al. (2008). «Scaling properties of sea ice deformation from buoy dispersion analysis». In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113 (C3).
-  Rampal, P. et al. (20 mag. 2016). «neXtSIM: a new Lagrangian sea ice model». In: *The Cryosphere* 10.3. Publisher: Copernicus GmbH, pp. 1055–1073.
-  Rampal, P. et al. (2019). «On the multi-fractal scaling properties of sea ice deformation». In: *The Cryosphere* 13.9, pp. 2457–2474.
-  Weiss, J. e D. Marsan (2004). «Scale properties of sea ice deformation and fracturing». In: *Comptes Rendus Physique* 5.7, pp. 735–751.

Bibliografia III



Weiss, J., E.M. Schulson e Harry L. Stern (2007). «Sea ice rheology from in-situ, satellite and laboratory observations: Fracture and friction». In: *Earth and Planetary Science Letters* 255.1, pp. 1–8.