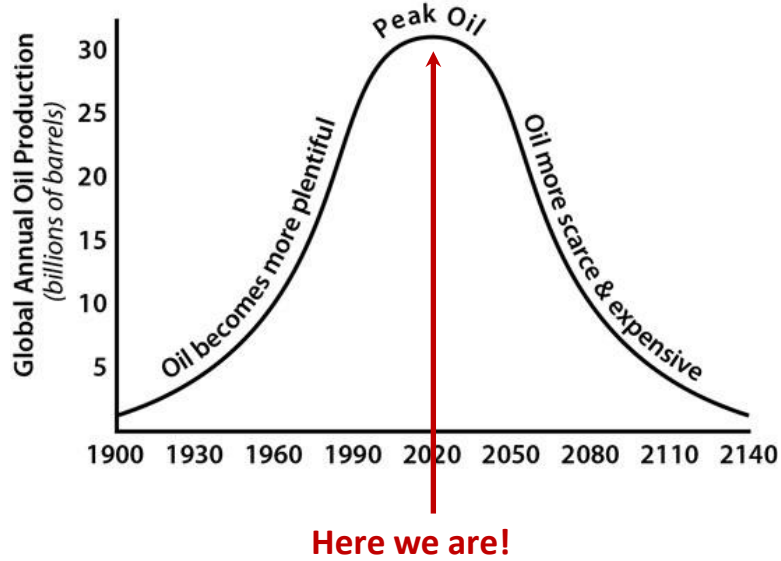


Le nanostrutture di carbonio e lo stoccaggio di energia elettrochimica

Silvio Scaravonati

Il problema energetico



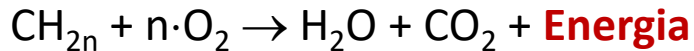
- ✓ L'85 % dell'energia primaria che utilizziamo proviene dai combustibili fossili
- ✓ Ogni secondo al mondo consumiamo 1000 barili di petrolio, 96.000 metri cubi di metano e 222 tonnellate di carbone!
- ✓ I combustibili fossili sono «comodi» ma **non sono rinnovabili!**

Una fonte è rinnovabile quando si rigenera in un tempo piccolo rispetto all'uomo

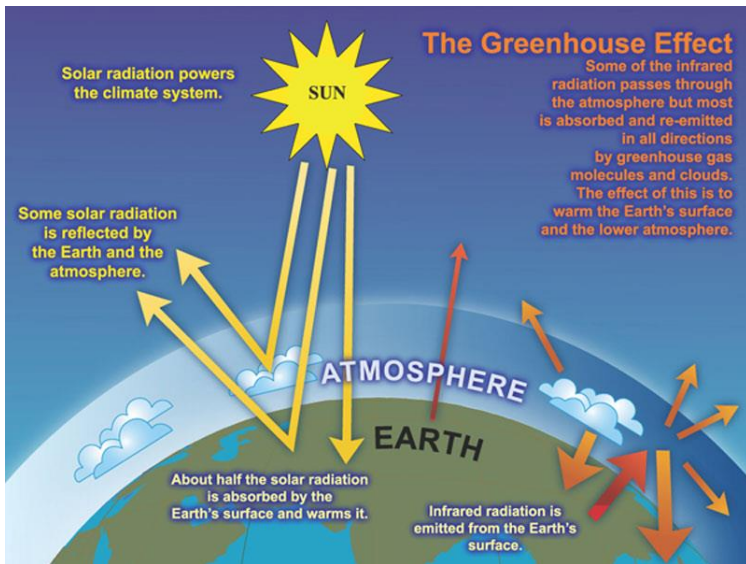
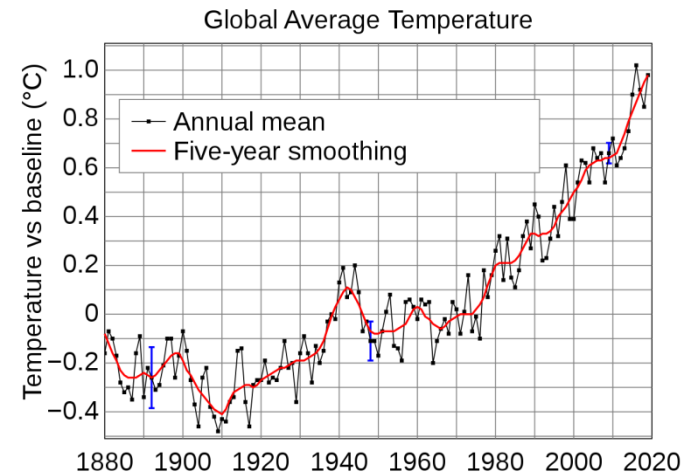


Il riscaldamento globale

- ✓ L'uso dei combustibili fossili immette nell'atmosfera CO₂ che contribuisce ad aumentare l'effetto serra nel pianeta

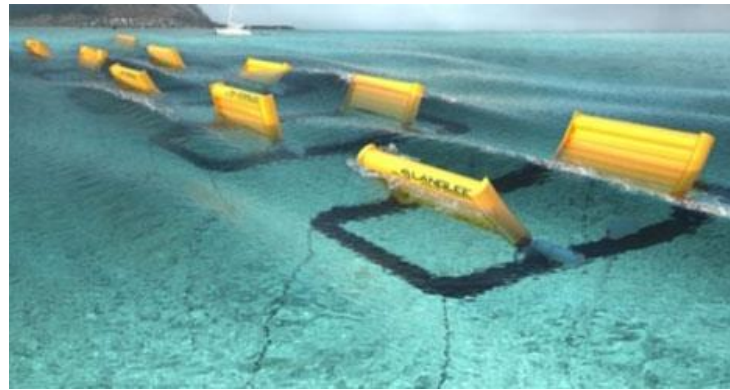
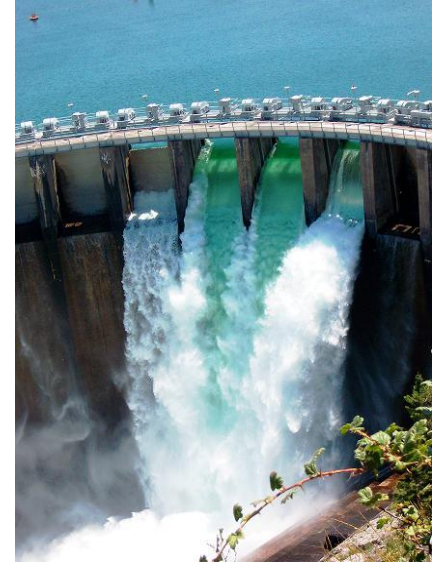


- ✓ Si produce **2.38 Kg** di CO₂ ogni litro di benzina consumato (circa 1.2 m³)!



Le fonti di energia rinnovabile

- ✓ Le fonti di energia rinnovabili non sono esauribili **nella scala dei tempi di ere geologiche**

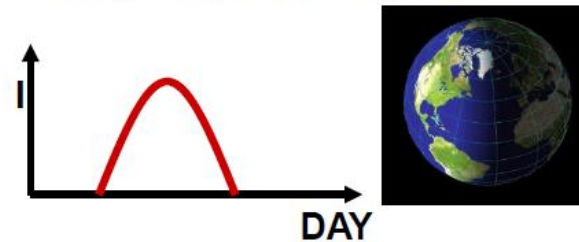


Le fonti di energia rinnovabile

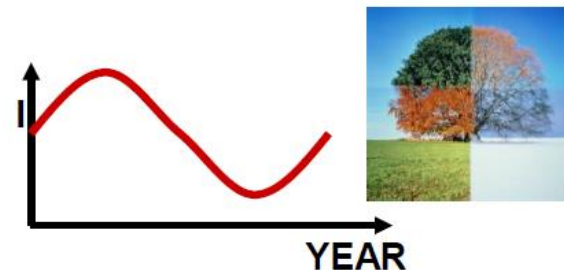
- ✓ Le fonti di energia rinnovabili non sono esauribili **nella scala dei tempi di ere geologiche**

- ✓ Hanno però il problema di essere intrinsecamente **intermittenti**

DAY - NIGHT CYCLE

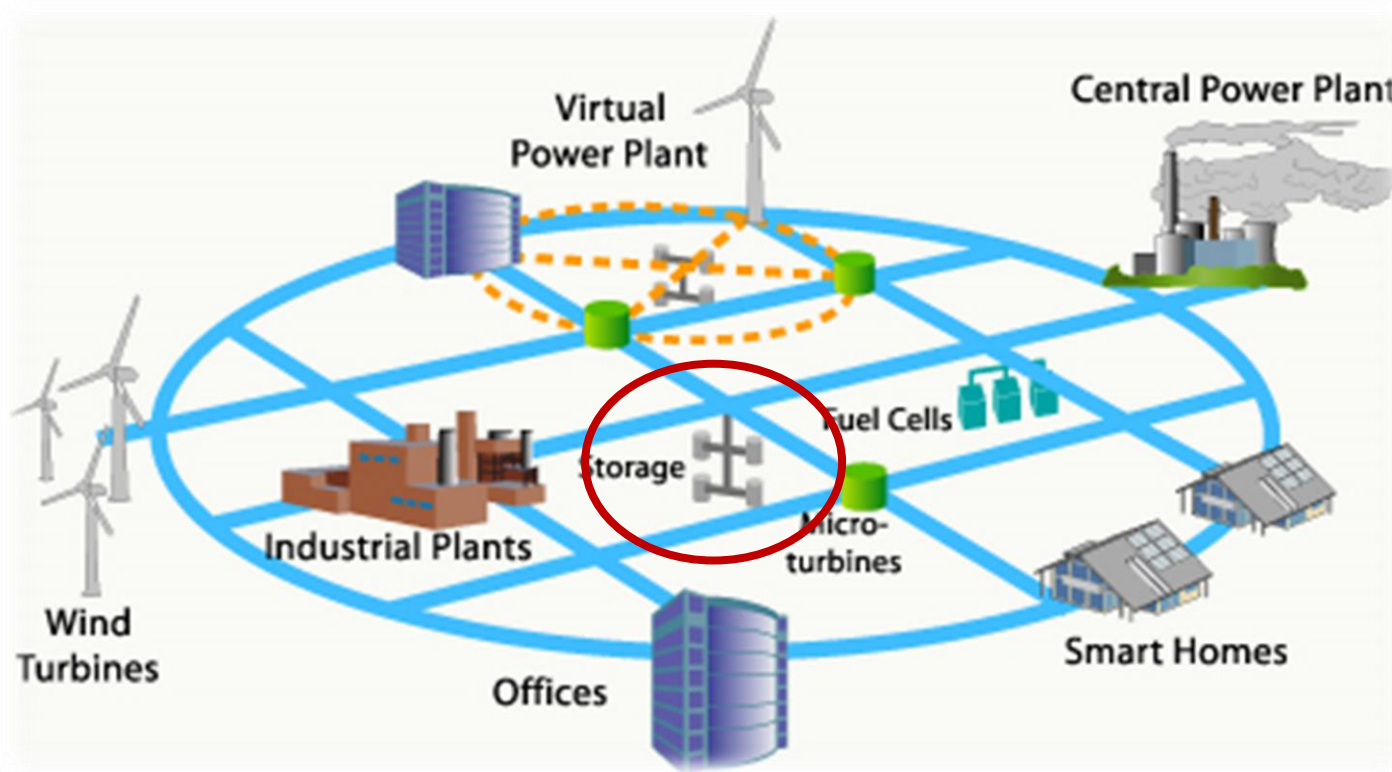


SEASONAL CYCLE



Concetto di Smart-Grid

- ✓ Generazione distribuita

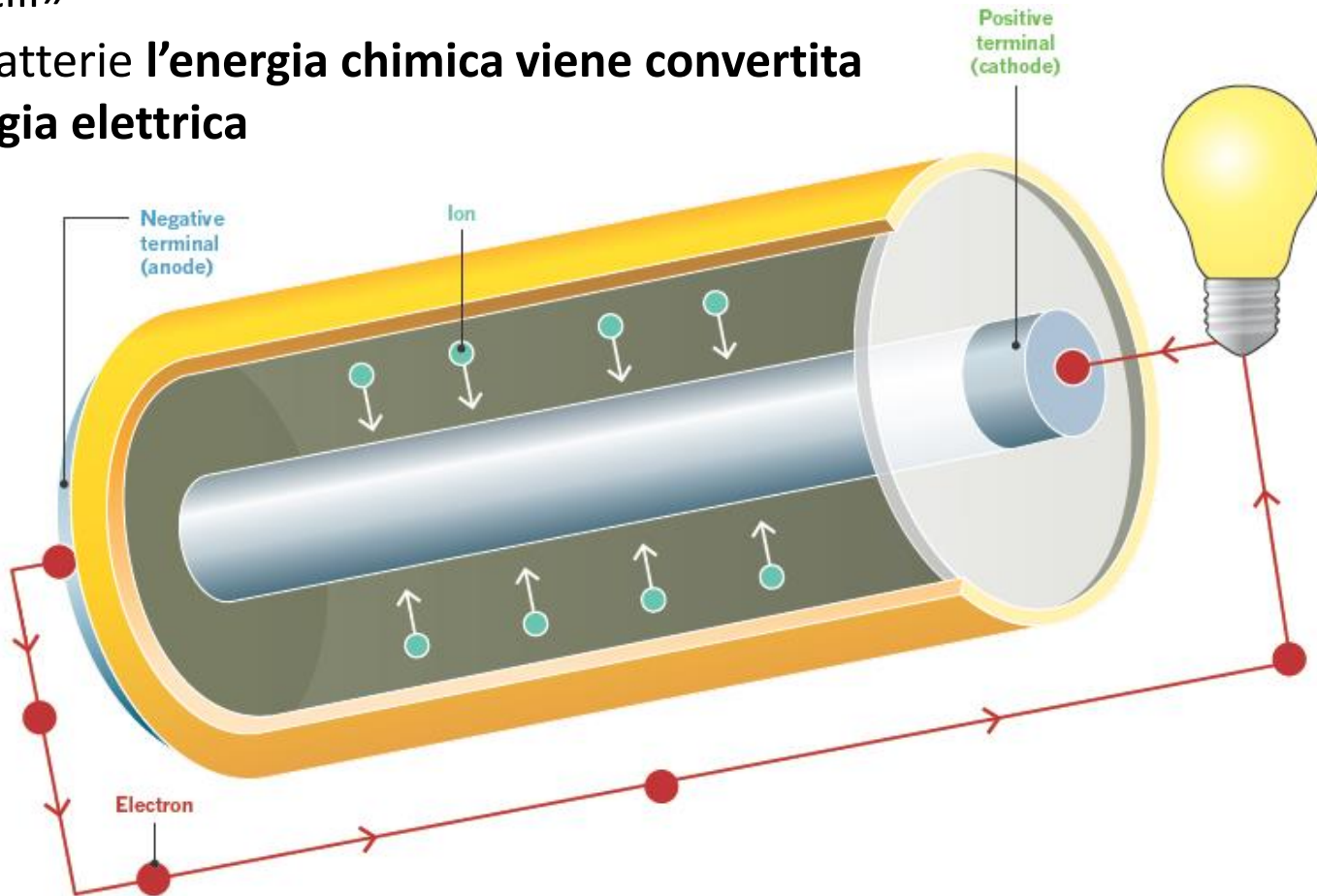


E' importante poter accumulare l'energia in modo efficiente!

Batterie

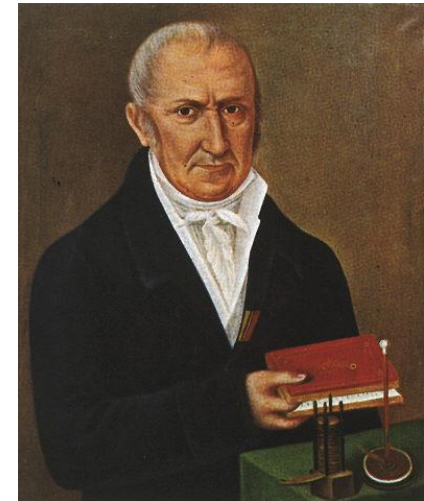
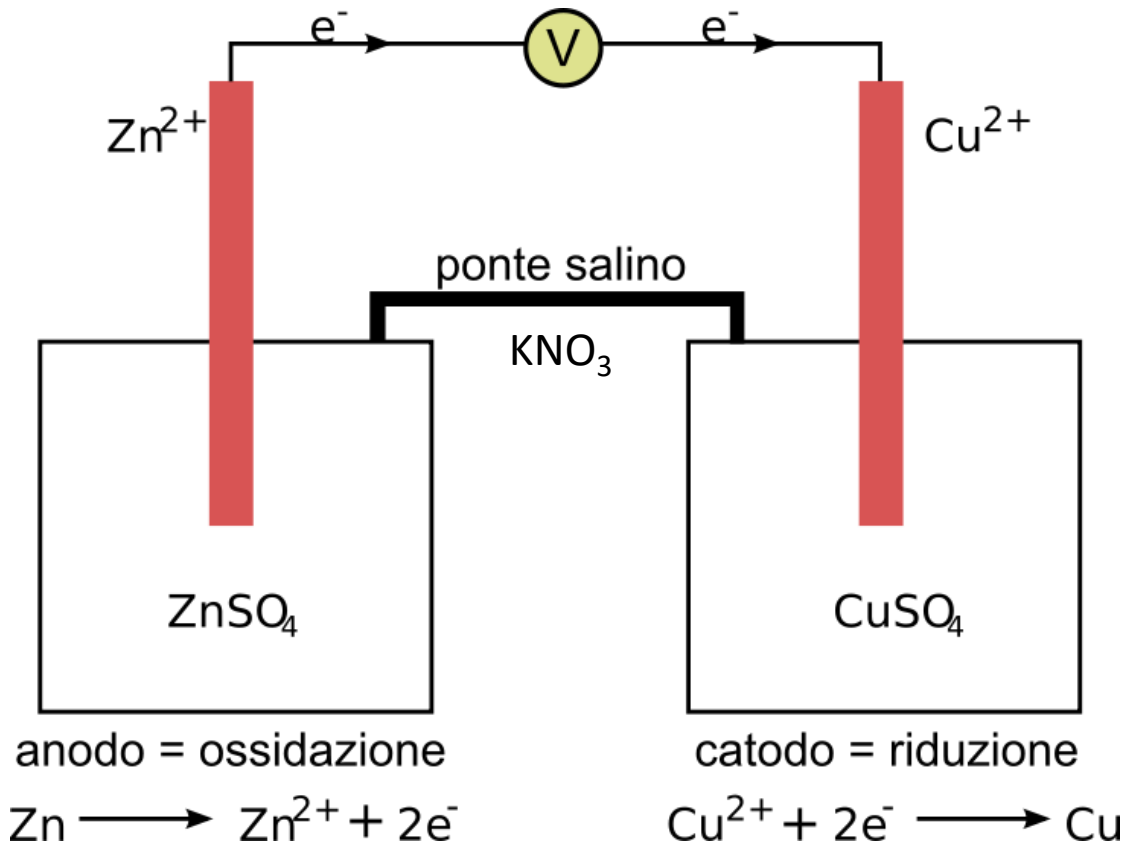
Le batterie

- ✓ Le batterie (o accumulatori elettrochimici) sono generatori di corrente «portatili»
- ✓ Nelle batterie **l'energia chimica viene convertita in energia elettrica**



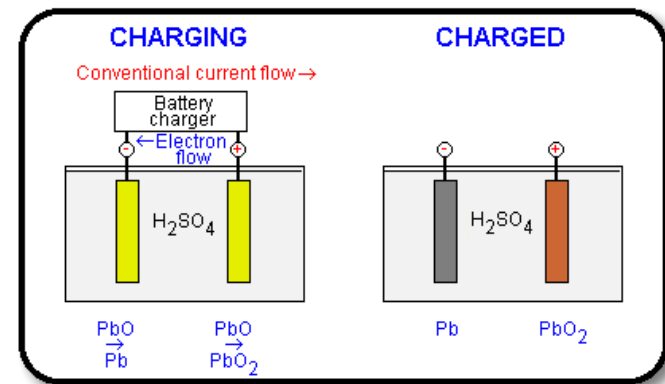
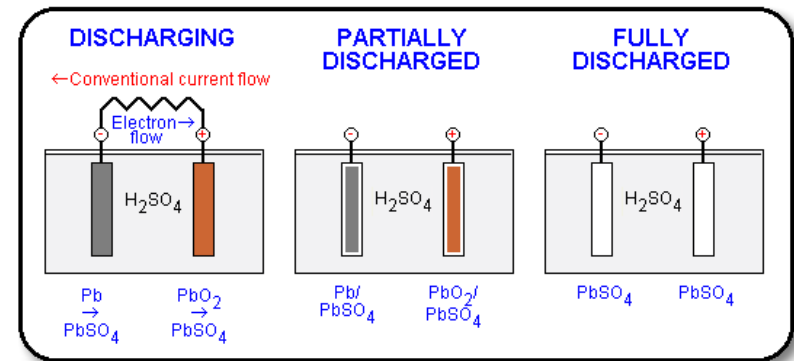
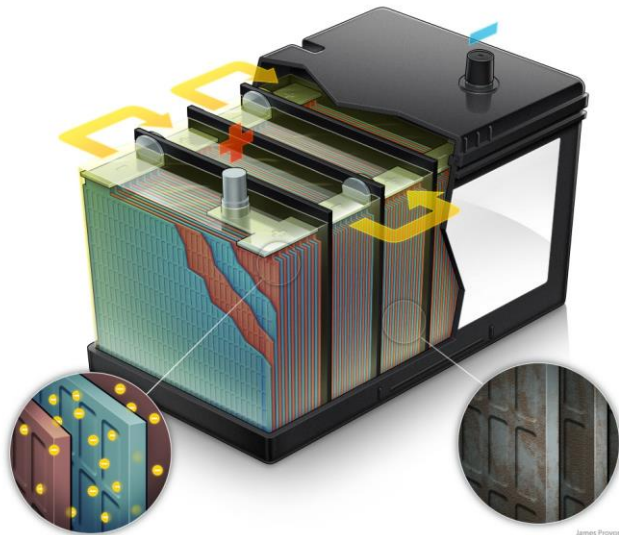
La pila di Volta e la pila Daniell

✓ Batterie Primarie



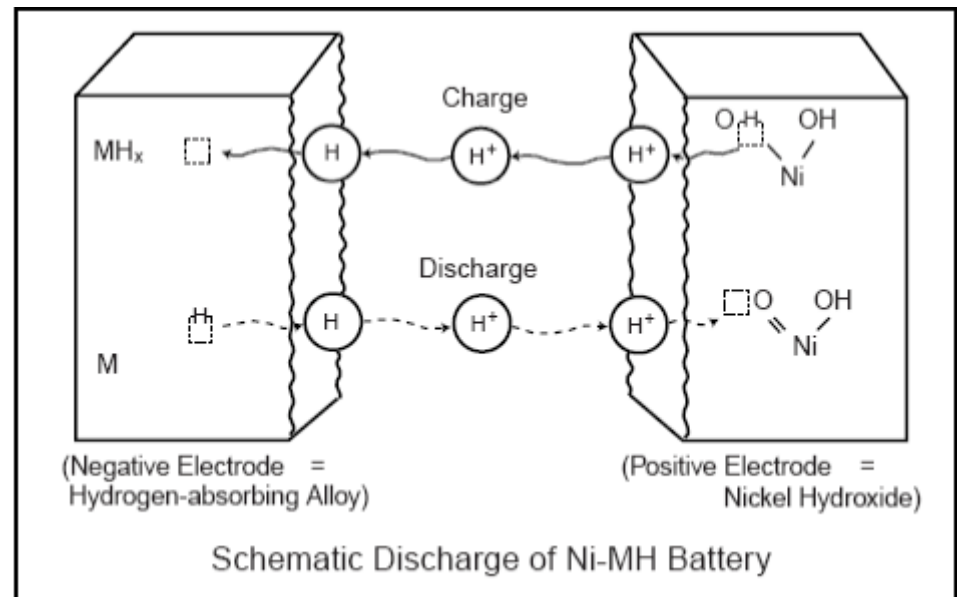
Batterie Piombo-Acido

- Batterie Secondarie (Ricaricabili)
- Utilizzate nelle automobili
- Economiche
- Scarse prestazioni

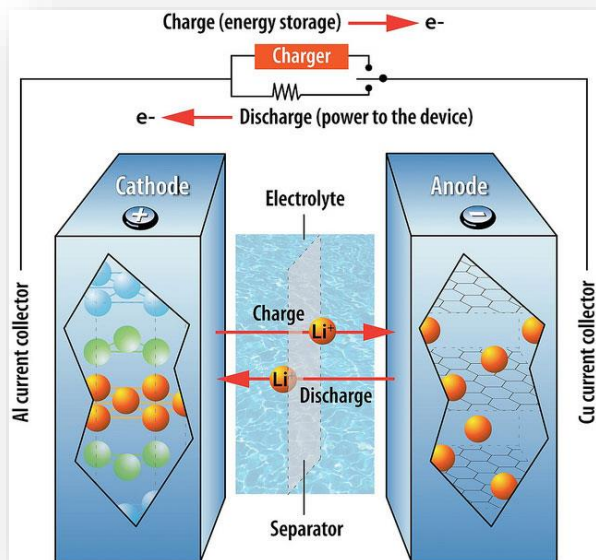


Batterie Nichel-Metallo Idruro

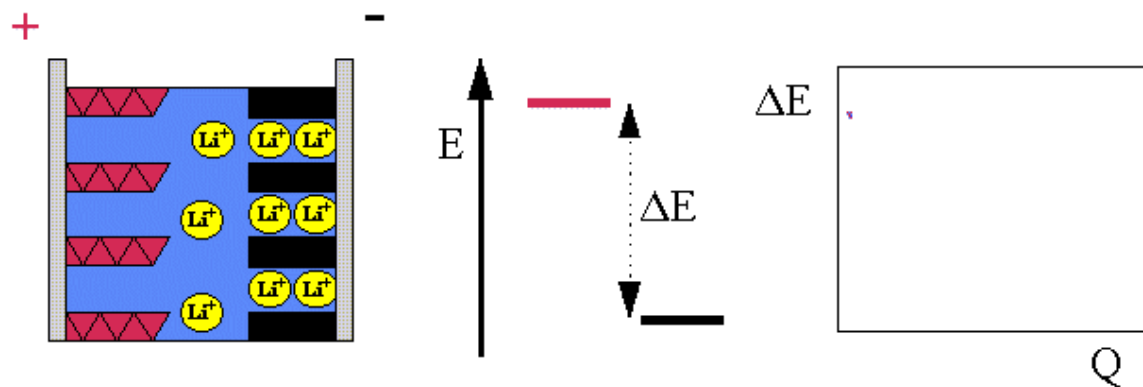
- Batterie Secondarie (Ricaricabili)
- Applicazioni ad alta temperatura
- Costi moderati
- Prestazioni medie



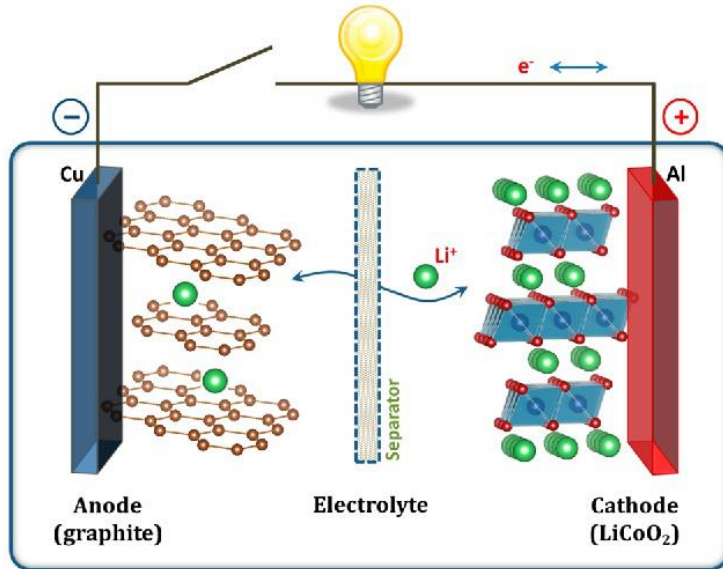
Batterie agli ioni di Litio



✓ Batterie Secondarie (Ricaricabili)

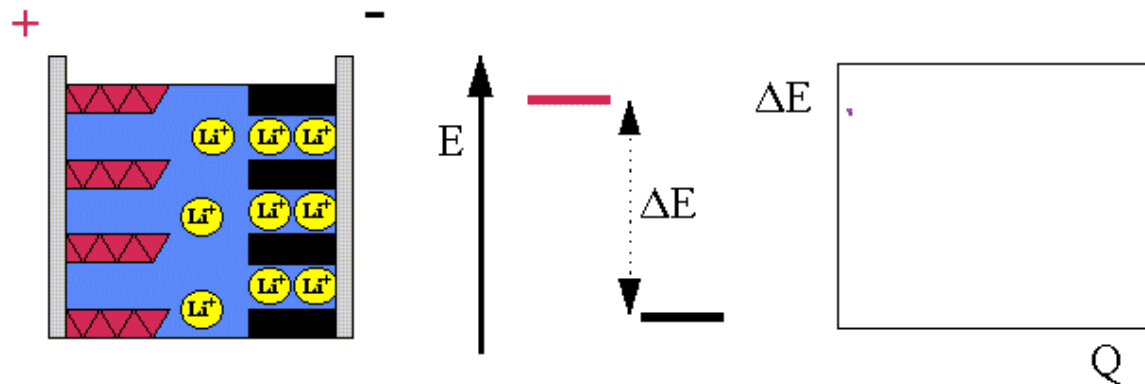
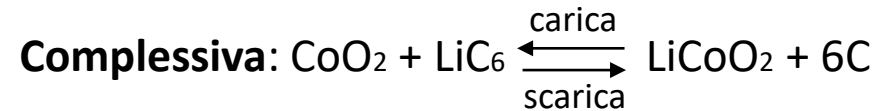
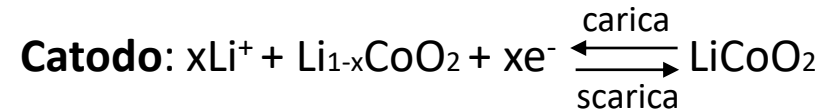
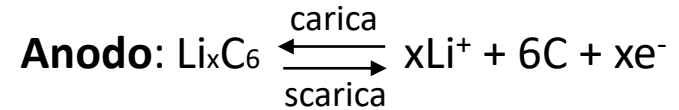


Principio di Funzionamento



Reazione spontanea: $\text{CoO}_2 + \text{LiC}_6 \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + \text{Li}_x\text{C}_6$

riduzione ossidazione



Principio di Funzionamento

Driving force: differenza di **energia libera di Gibbs**

$$\Delta G = \sum \Delta G(\text{products}) - \sum \Delta G(\text{reagents})$$

$$\Delta G = [\Delta G(\text{CoO}_2) + \Delta G(\text{LiC}_6)] - [\Delta G(\text{LiCoO}_2) + \Delta G(\text{C})]$$

Definizione di energia libera di Gibbs:

$$G = H - TS = U + PV - TS$$

$$\Delta G = \Delta U + P\Delta V - T\Delta S$$

$$\Delta U = T\Delta S - P\Delta V - zF\Delta V$$



$$\Delta G = zF\Delta V$$

z = numero di elettroni

F = costante di Faraday = 96487 C / mol

ΔV = potenziale di riduzione

Principio di Funzionamento

$$\Delta G = zF\Delta V$$

Potenziali di riduzione standard:

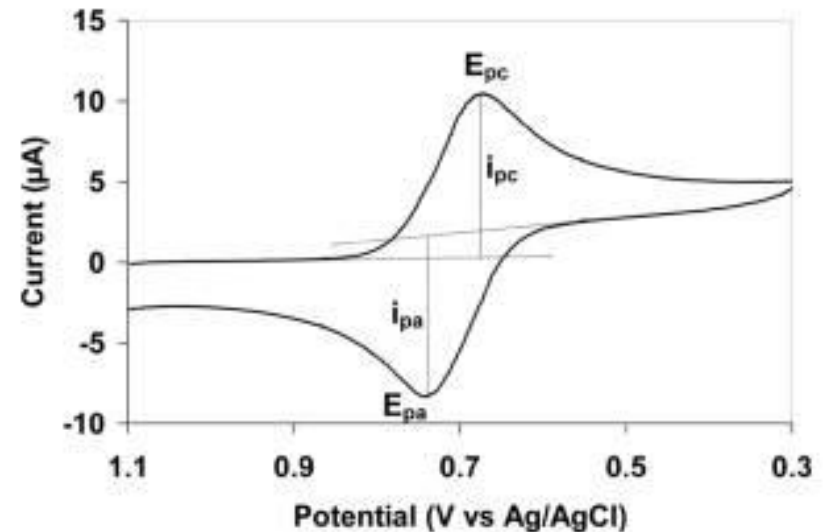
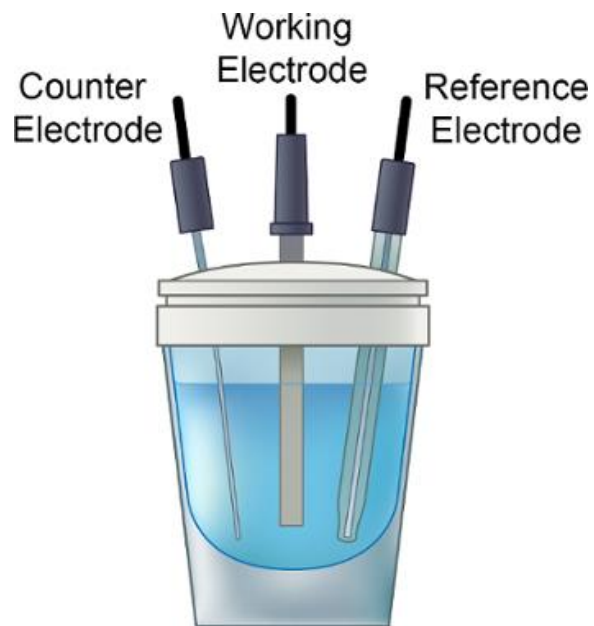
The table below lists standard reduction potentials for various half-reactions. A red oval highlights the 'Standard Potential (V)' column. A red arrow on the left indicates that oxidizing agents become stronger as the potential increases, while a blue arrow on the right indicates that reducing agents become stronger as the potential decreases.

Half Reaction	Standard Potential (V)
$\text{F}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	+2.87
$\text{Pb}^{4+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}$	+1.67
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1.36
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{Ag}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0.80
$\text{Fe}^{3+} + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+0.77
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0.34
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.00
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.13
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.76
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.36
$\text{Li}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.05

Definisce la differenza di potenziale di una reazione!

Potenziale di Riduzione Standard

- Si misura tramite la Voltammetria Ciclica



Assemblaggio e Caratterizzazione

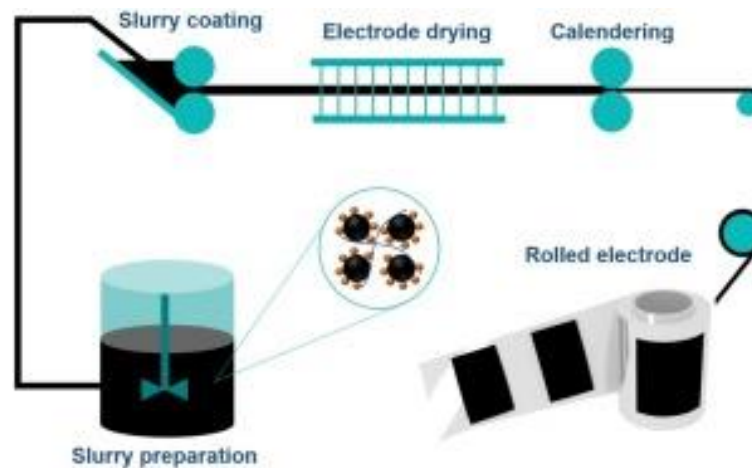
Preparazione degli elettrodi

- Miscelazione dei componenti

Materiale Attivo: Catodo o Anodo 85%

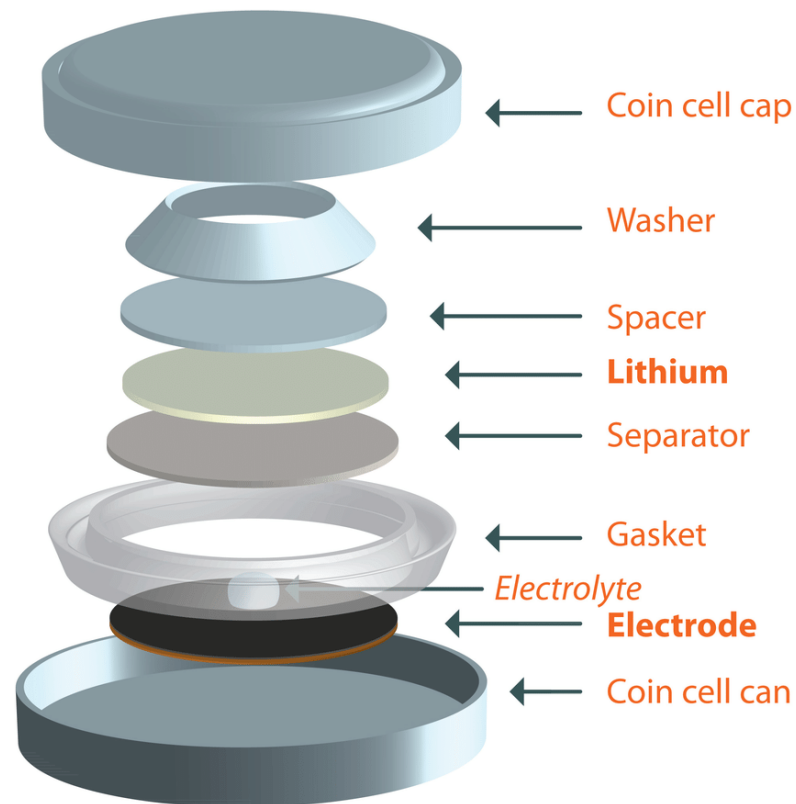
Legante: PVDF, PAA, CMC 10%

Agente Conduttivo: Nero di Carbone 5%

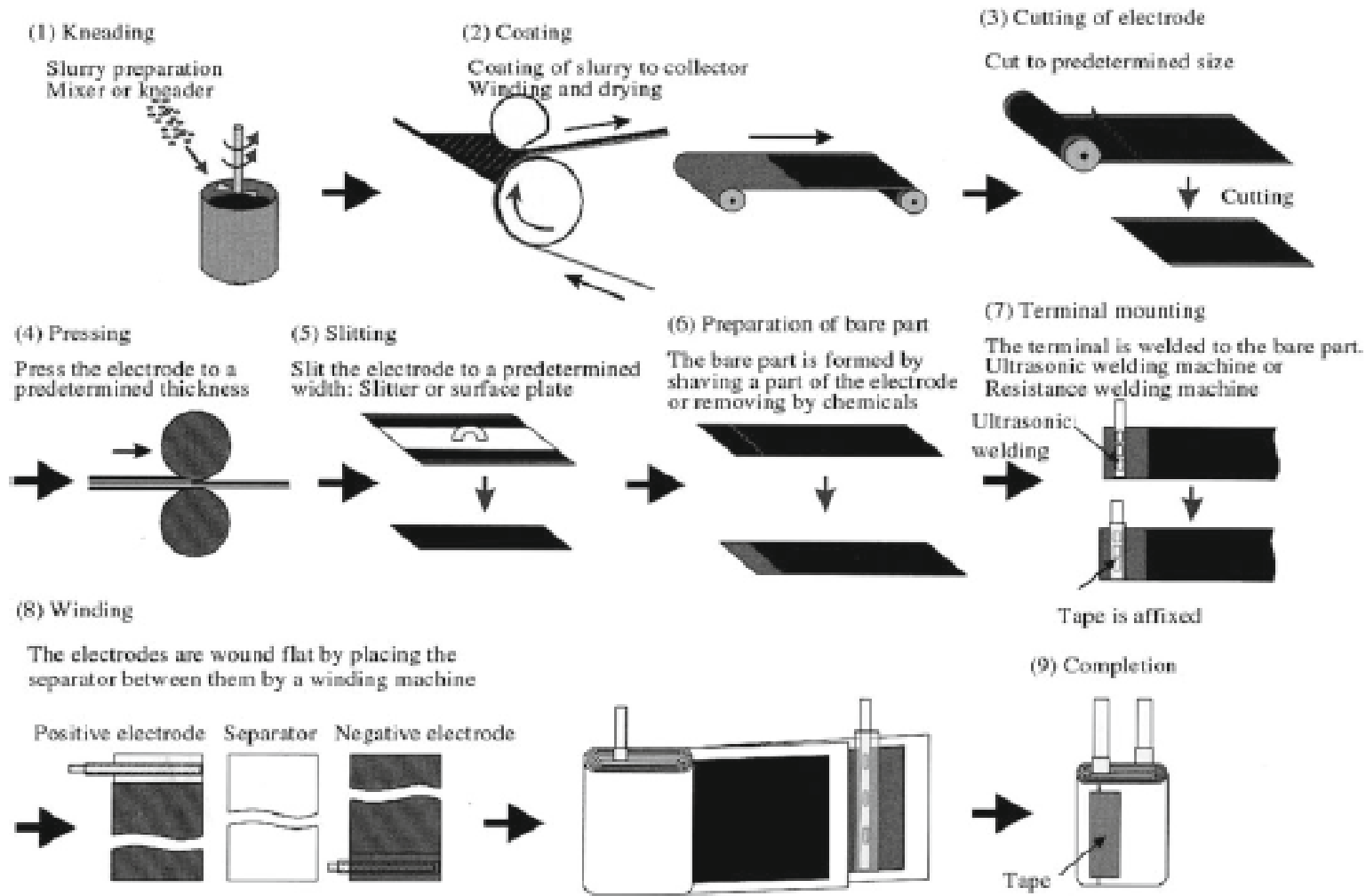


Assemblaggio di una batteria al litio

- Coin Cell (Batteria a Bottone)

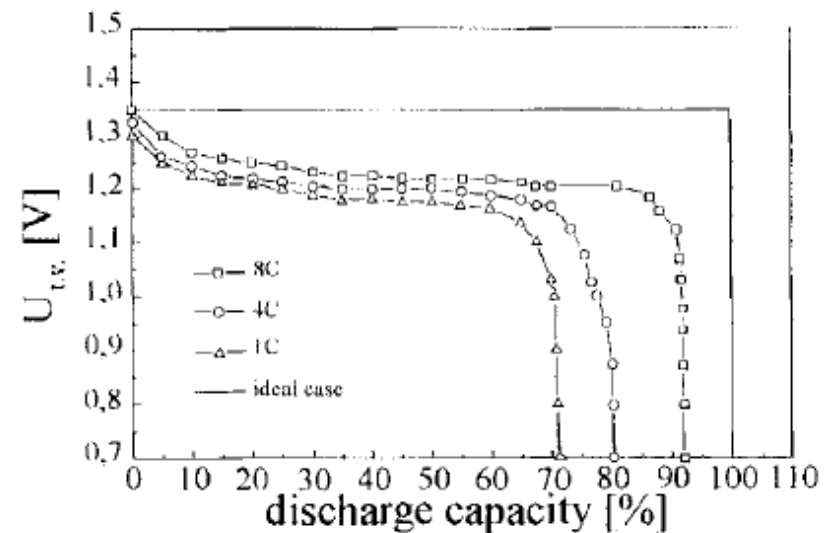


Assemblaggio di una batteria al litio



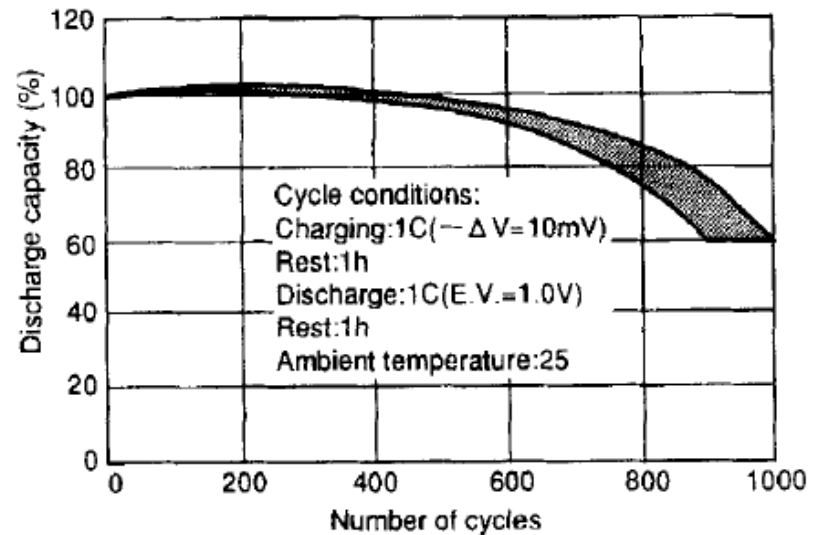
Caratterizzazione di una batteria

- ✓ Generalmente si caratterizzano i singoli componenti di una batteria (elettrodi) utilizzando una **semicella** (l'altro elettrodo è il Li metallico)
- ✓ **Capacità:** quanta carica elettrica la batteria è in grado di accumulare (si misura solitamente in mAh/g)
- ✓ **Voltaggio o Tensione:** differenza di potenziale tra anodo e catodo (in V).
- ✓ **Energia:** quanta energia elettrica la batteria è in grado di erogare (si misura solitamente in Wh/g)
- ✓ **Potenza:** quanta energia elettrica la batteria è in grado di erogare per unità di tempo (si misura solitamente in W / kg)



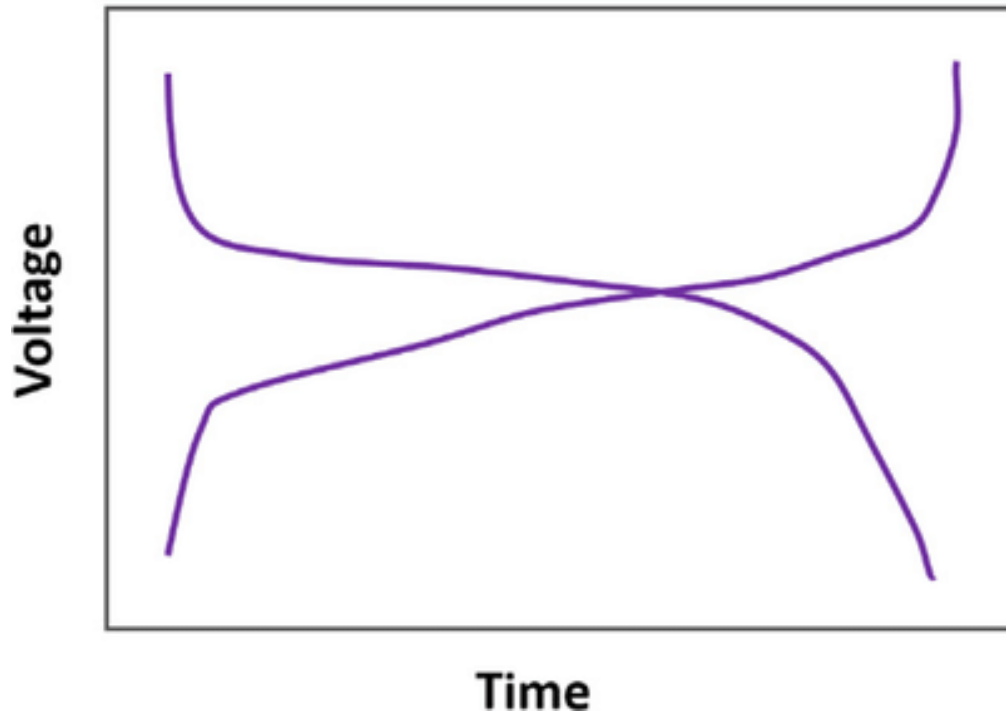
Caratterizzazione di una batteria

- ✓ **Velocità di carica/scarica:** corrente alla quale la batteria viene scaricata. Si misura in A oppure in C-rate, ovvero il rapporto tra la corrente di carica/scarica e la corrente necessaria a scaricare la batteria in un'ora
- ✓ **Efficienza:** rapporto fra la carica estratta dalla batteria ($Q_{\text{discharge}}$) e quella iniettata (Q_{charge})
- ✓ **Reversibilità:** variazione della capacità in funzione dei cicli di carica/scarica
- ✓ **Resistenza interna:** resistenza di tutti i componenti della batteria



Caratterizzazione di una batteria

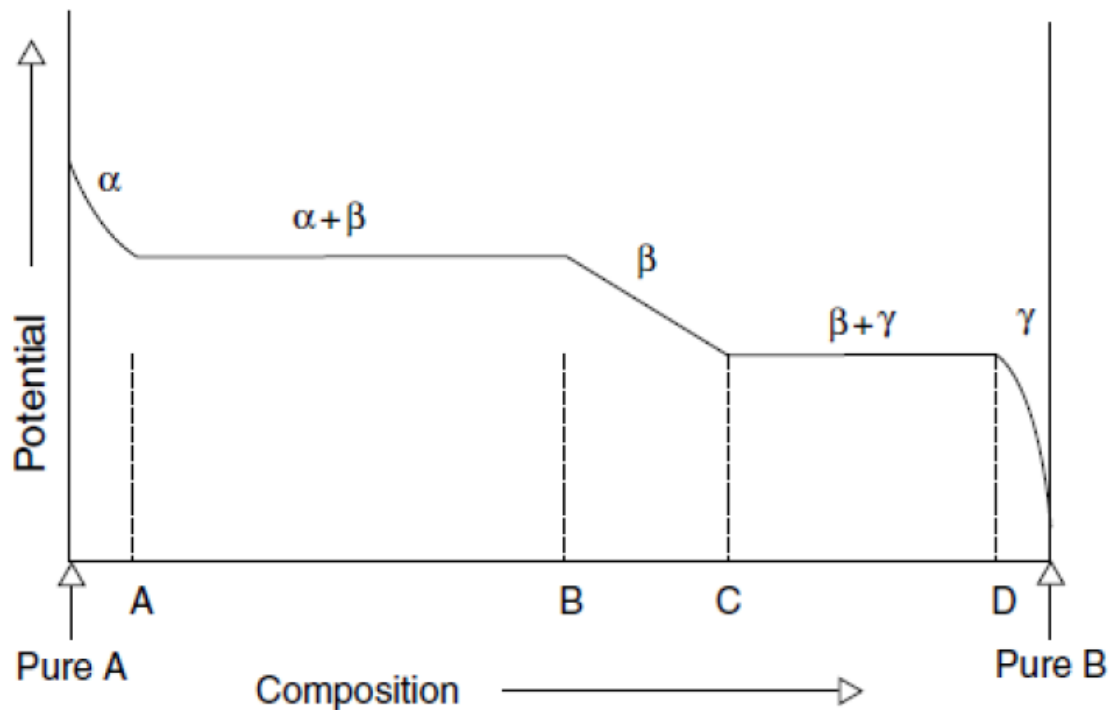
- Cronopotenziometria Galvanostatica
- Corrente Costante



Caratterizzazione di una batteria


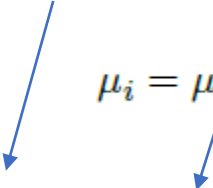
Possibile presenza di plateau multipli

Regola delle Fasi di Gibbs: $F = C - P + 2$



Caratterizzazione di una batteria

Differenza di potenziale: $V_{\text{catodo}} - V_{\text{anodo}}$

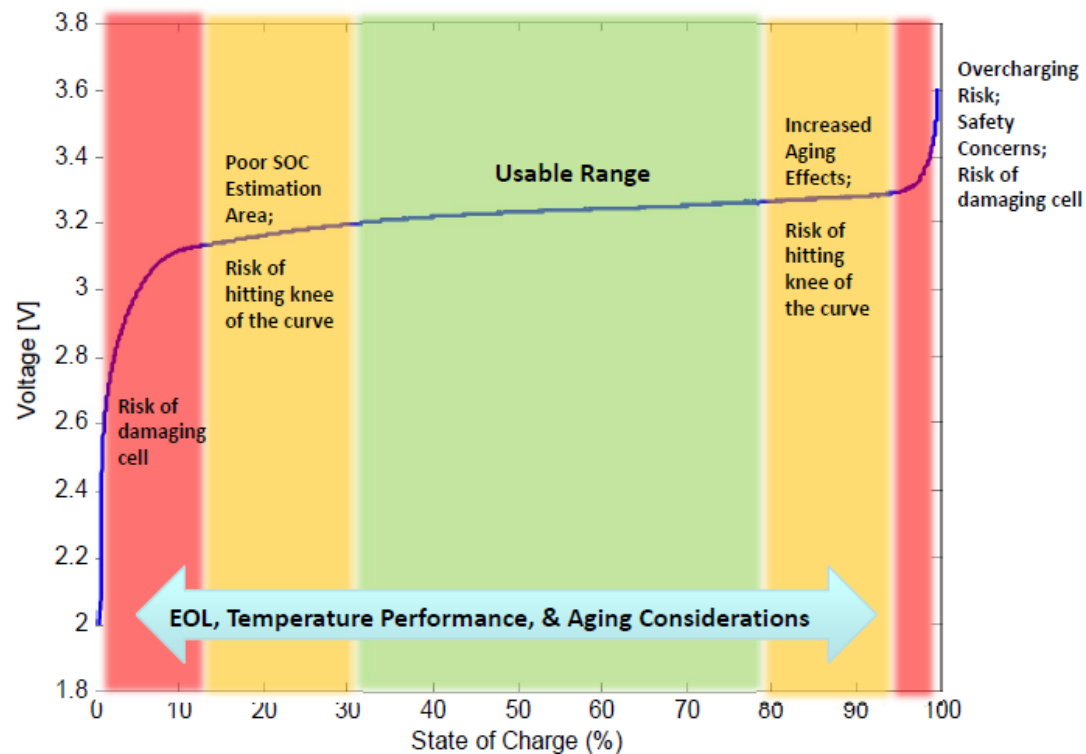
$$\Delta G = \sum_{i=1}^N \nu_i \cdot \mu_i$$

$$-\frac{\Delta G}{zF} = \Delta V_0 = \frac{1}{zF} \sum_{i=1}^N \nu_i \cdot \mu_i$$
$$\Delta G = -zF \Delta V_0$$
$$\mu_i = \mu_{i0} + RT \cdot \ln(c_i)$$

$$\Delta V = \Delta V_0 + \frac{RT}{zF} \sum_{i=1}^N \nu_i \cdot \ln(c_i)$$

Equazione di Nernst: descrive l'andamento della differenza di potenziale

Caratterizzazione di una batteria

$$\Delta V = \Delta V_0 + \frac{RT}{zF} \sum_{i=1}^N \nu_i \cdot \ln(c_i)$$

$$\Delta V_{real} = \Delta V - \sum |\eta|$$



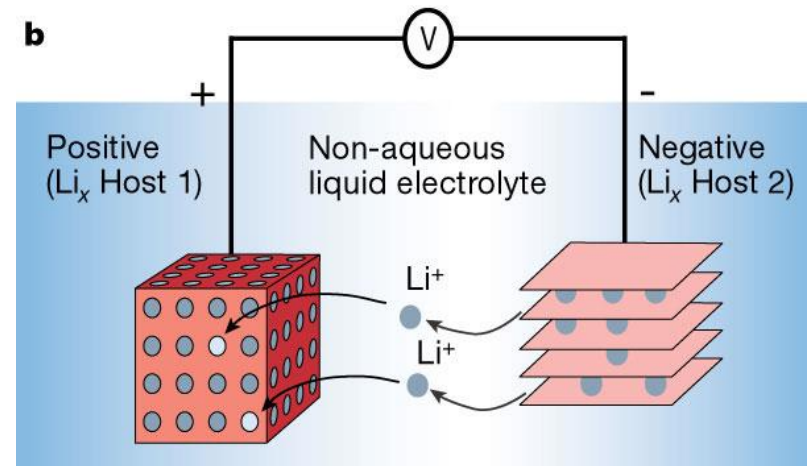
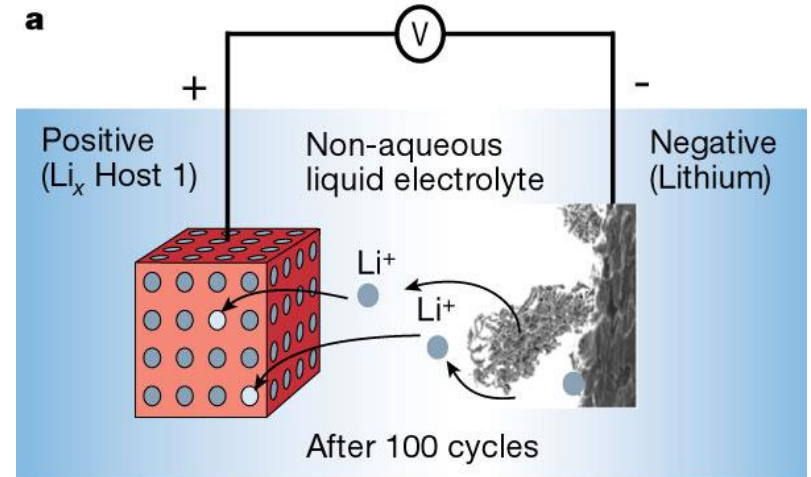
Batterie al Litio – Stato dell'Arte

Anodi nelle batterie al litio

- ✓ All'inizio le batterie al litio avevano un anodo formato da **litio puro**.
- ✓ Possibile formazione di **dendriti** che andavano a cortocircuitare la batteria, facendola esplodere!

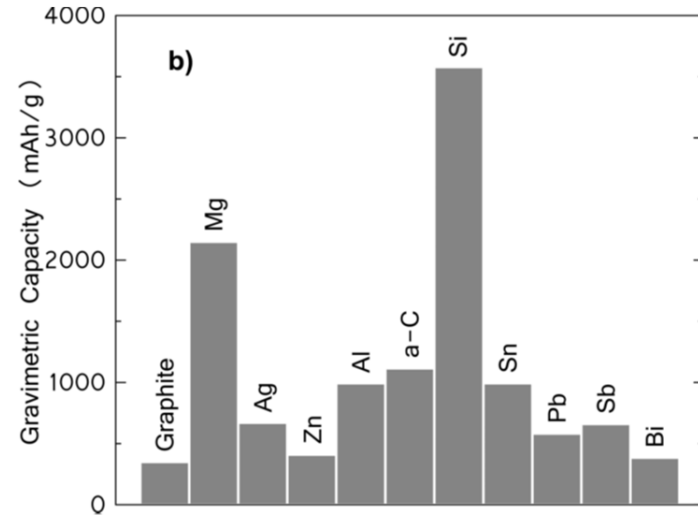
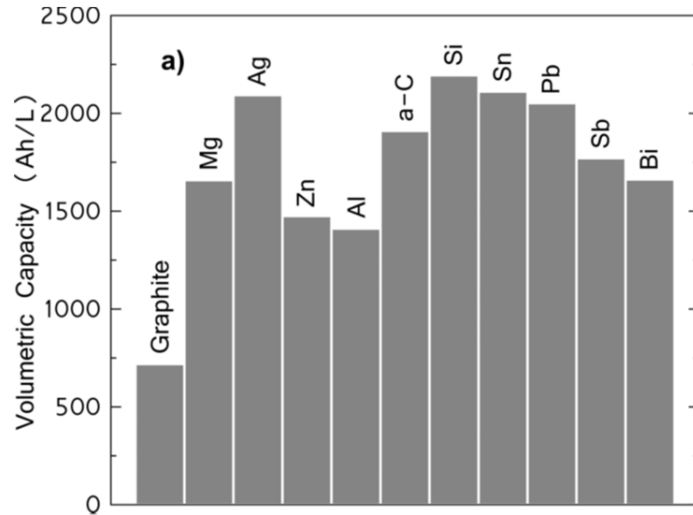
SONY

- ✓ 1991 – commercializzazione della prima batteria al litio con **anodo in grafite**
- ✓ La grafite intercala il litio fino alla stechiometria LiC_6 e non forma dendriti. Molto più sicura!

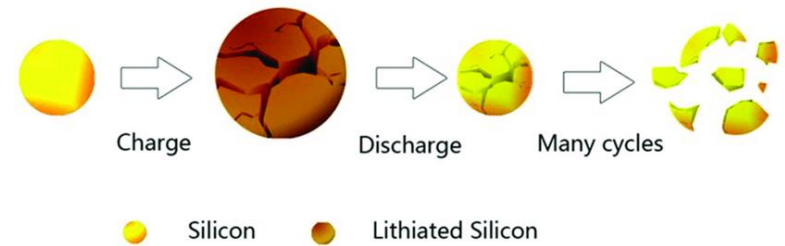


Anodi nelle batterie al litio

- Anodi Avanzati

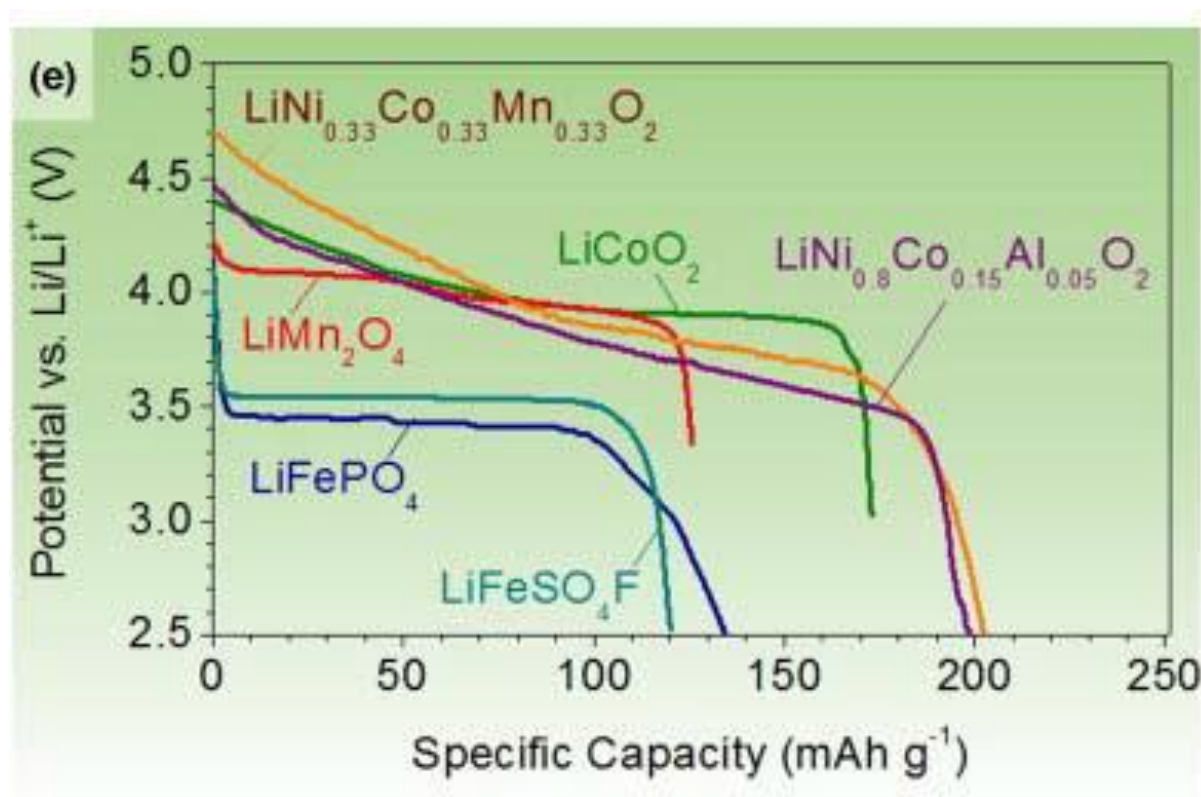


- Silicio → Candidato promettente, ma problemi di rottura



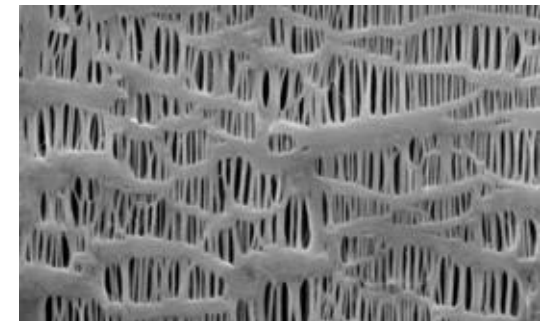
Catodi nelle batterie al litio

- Potenziali a Confronto



Elettroliti nelle batterie al litio

- Separatore: polimero poroso polipropilene-polietilene



- Elettroliti: Sali di litio disciolti in solventi organici

Sali: LiPF_6 , LiAsF_6

Solventi: Etilene Carbonato, Dietil Carbonato, Dimetil Carbonato

Prospettive per le batterie al litio

Sicurezza delle batterie al litio

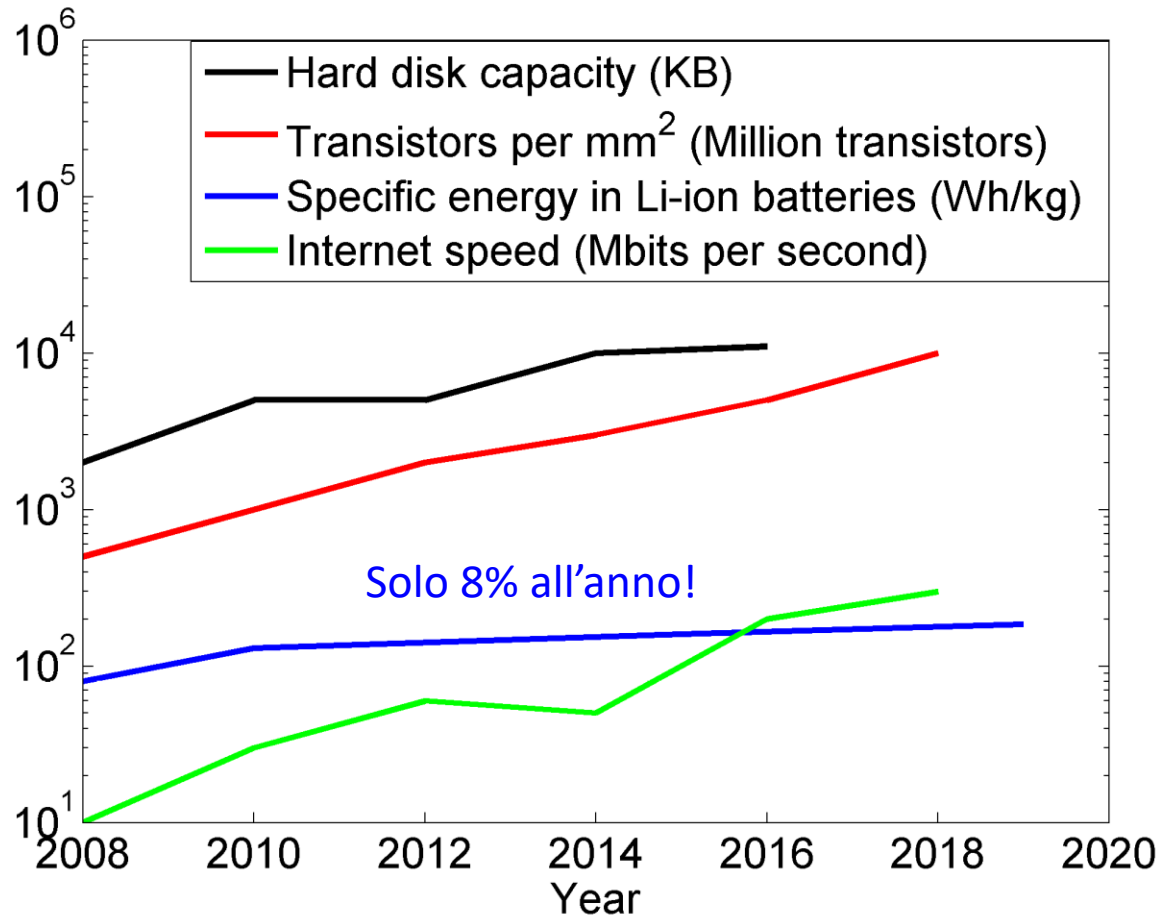
- ✓ Le batterie al litio sono sicure?



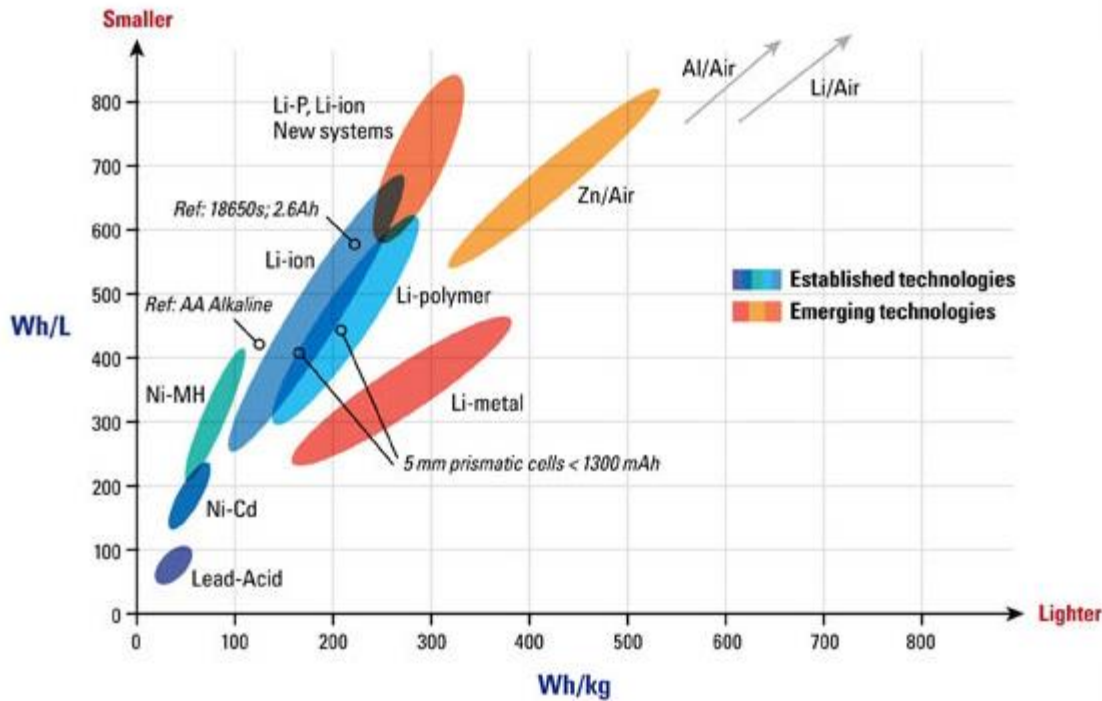
- ✓ Il litio reagisce violentemente con l'acqua e con l'ossigeno!
- ✓ Una batteria al litio **può esplodere se surriscaldata o caricata eccessivamente**
- ✓ Reagendo con l'acqua, il litio forma LiOH e idrogeno, che è un gas esplosivo!



Una crescita «lenta»



Una imminente rivoluzione?



Servono delle batterie più efficienti!

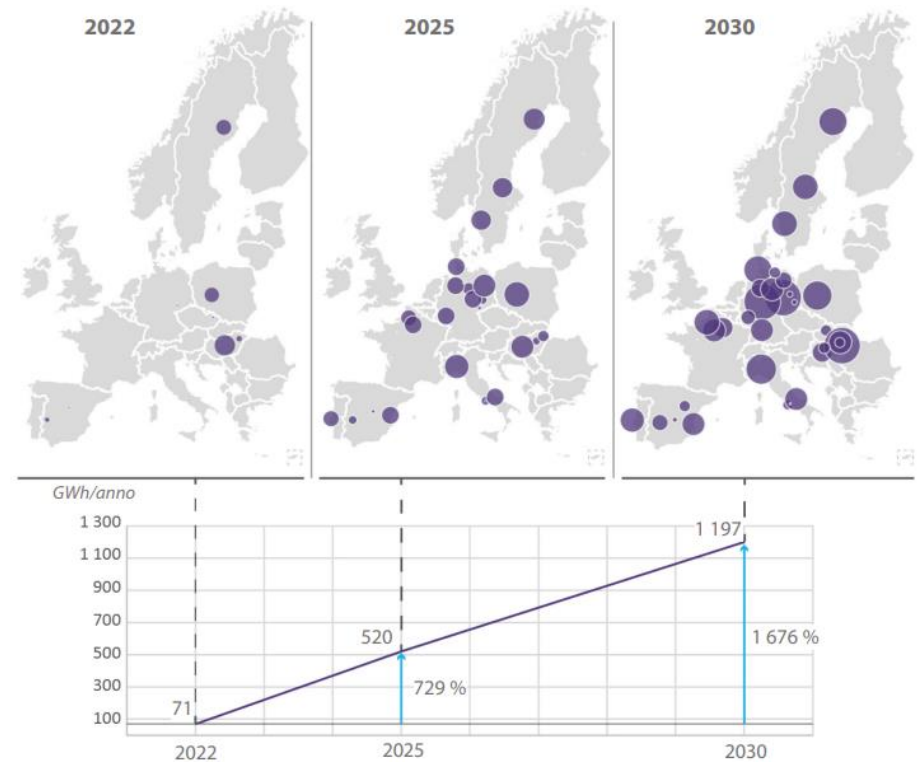
Finanziamenti europei

44 GWh nel 2020



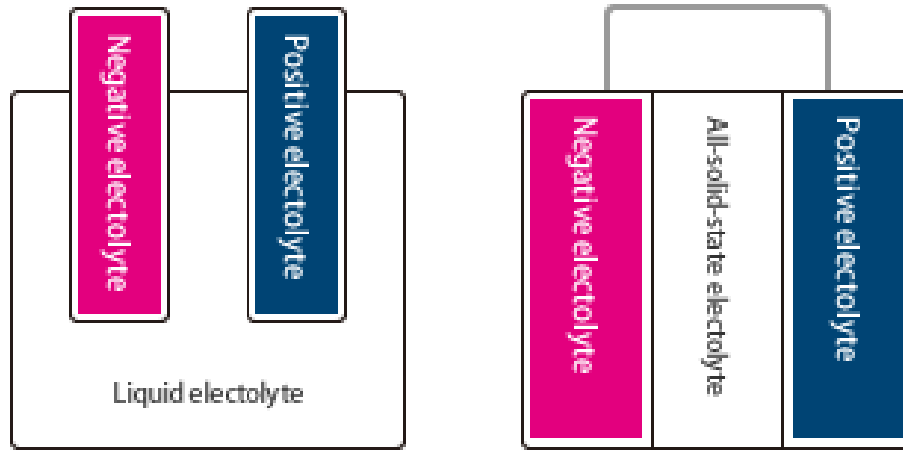
1200 GWh nel 2030

- Più di 7 miliardi di euro nel periodo 2014-2020



Relazione della Corte dei Conti Europea, 2023

Un futuro «solido»

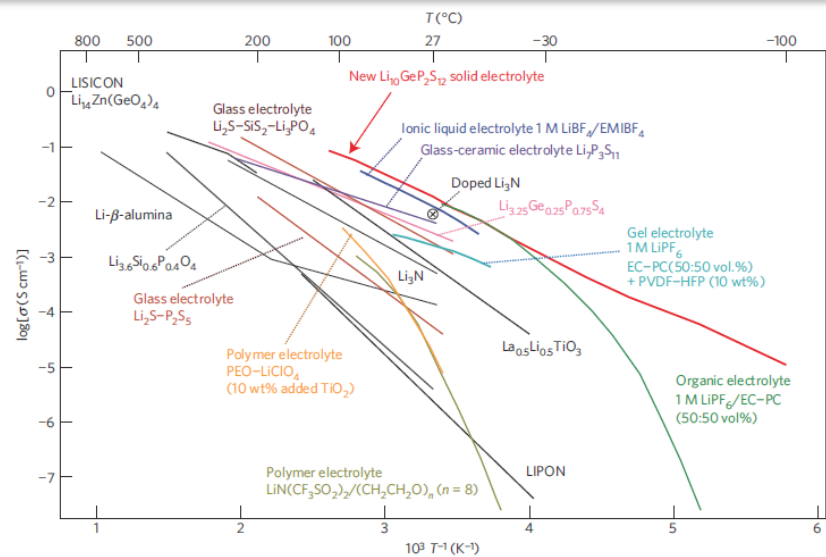
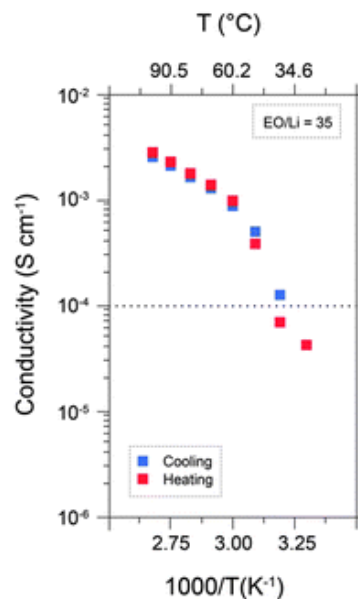
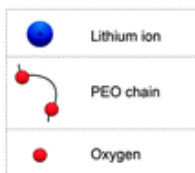
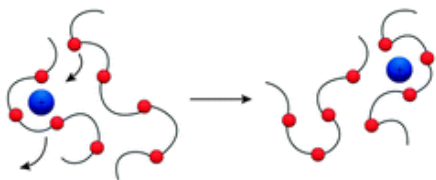
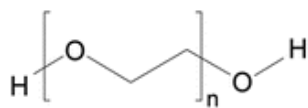


- ✓ Utilizzando un **elettrolita solido** la batteria diventa ancora più sicura
 - ✓ Le **batterie a stato solido** sono **flessibili** e usano il **Li** come anodo, maggiore capacità
- Ma...*
- ✓ La conducibilità ionica degli elettroliti solidi è **inferiore** a quella degli elettroliti liquidi e le temperature di uso **superiori**

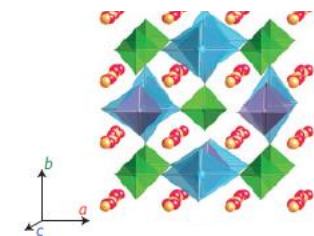
Elettroliti polimerici vs ceramici

- ✓ **Elettroliti polimerici:** flessibilità, economicità, ma transizione vetrosa (conduttiva) sopra RT

Ossido di polietilene (PEO) + sale di litio (+ polvere ceramica)

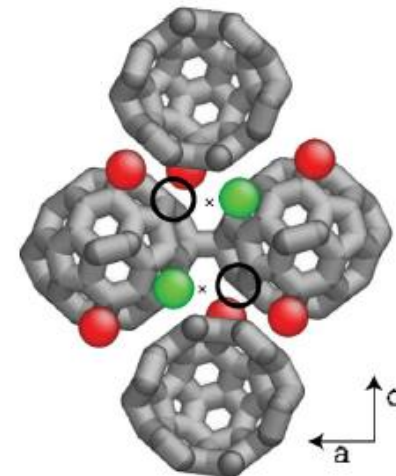
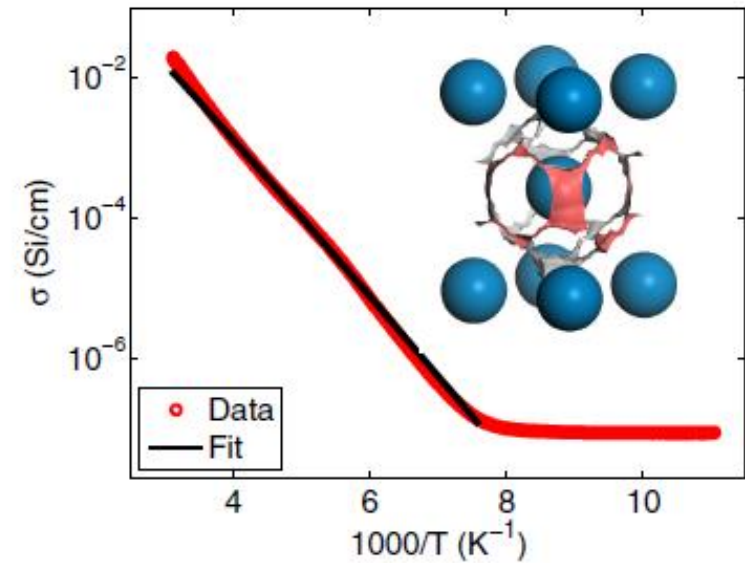
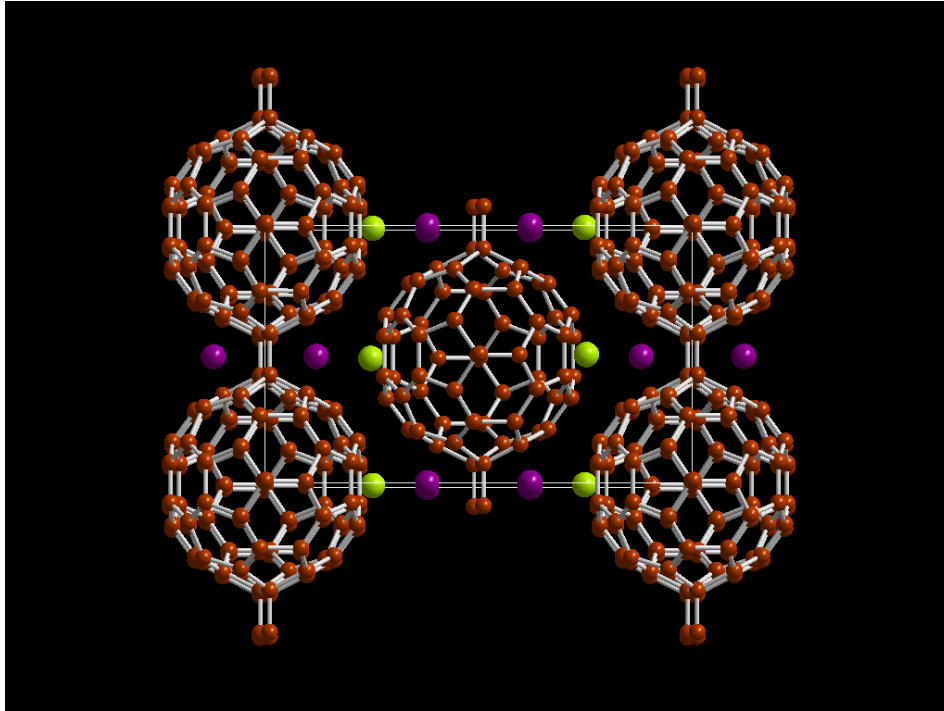


Es.: $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$



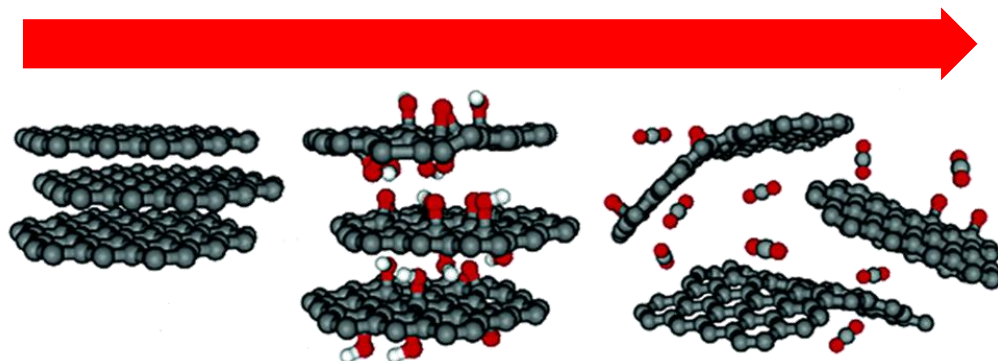
- ✓ **Elettroliti solidi:** stabilità elettrochimica e termica, ma bassa conducibilità ionica, **problemi all'interfaccia**

Li_4C_{60} : un conduttore super-ionico



M. Riccò et al., Phys. Rev. Lett. 102, 145901 (2009)

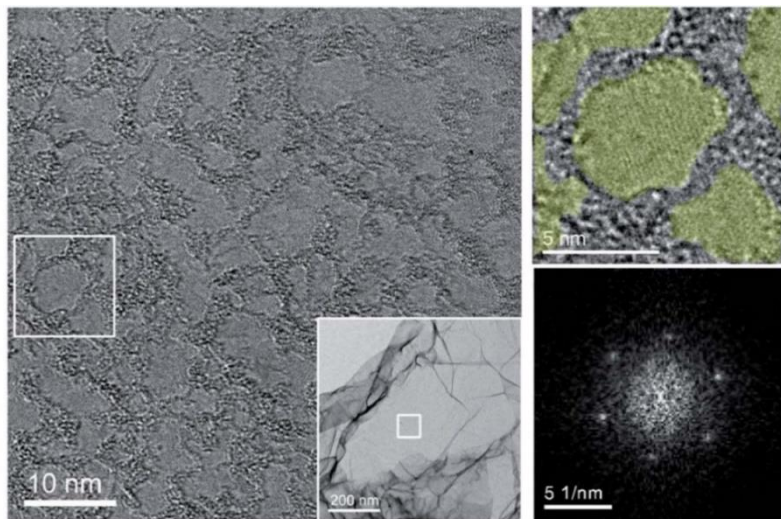
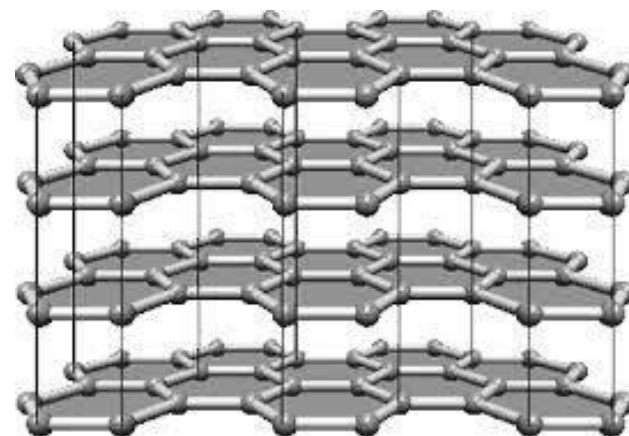
Il grafene nelle batterie al litio



Graphite

Graphite oxide

Graphene

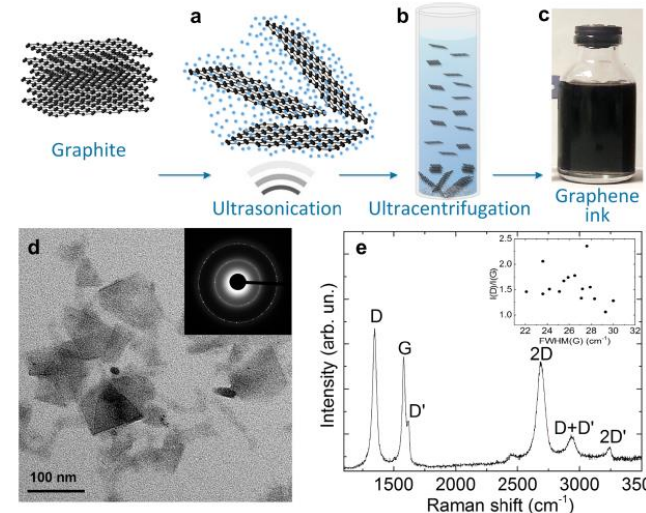
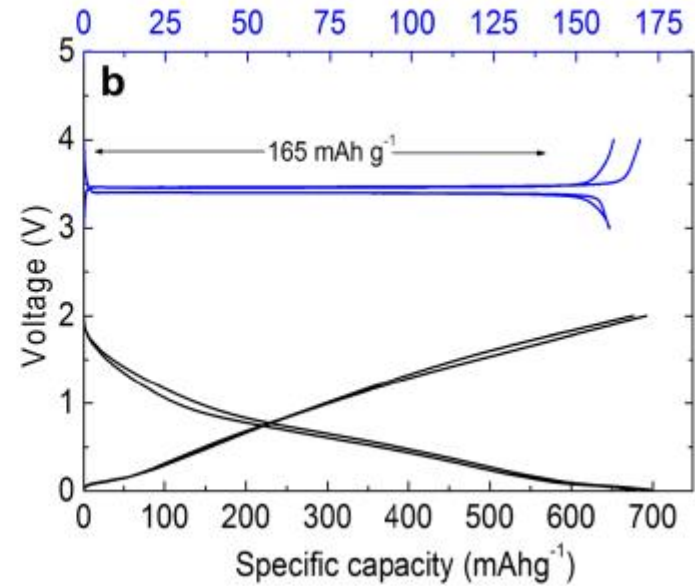
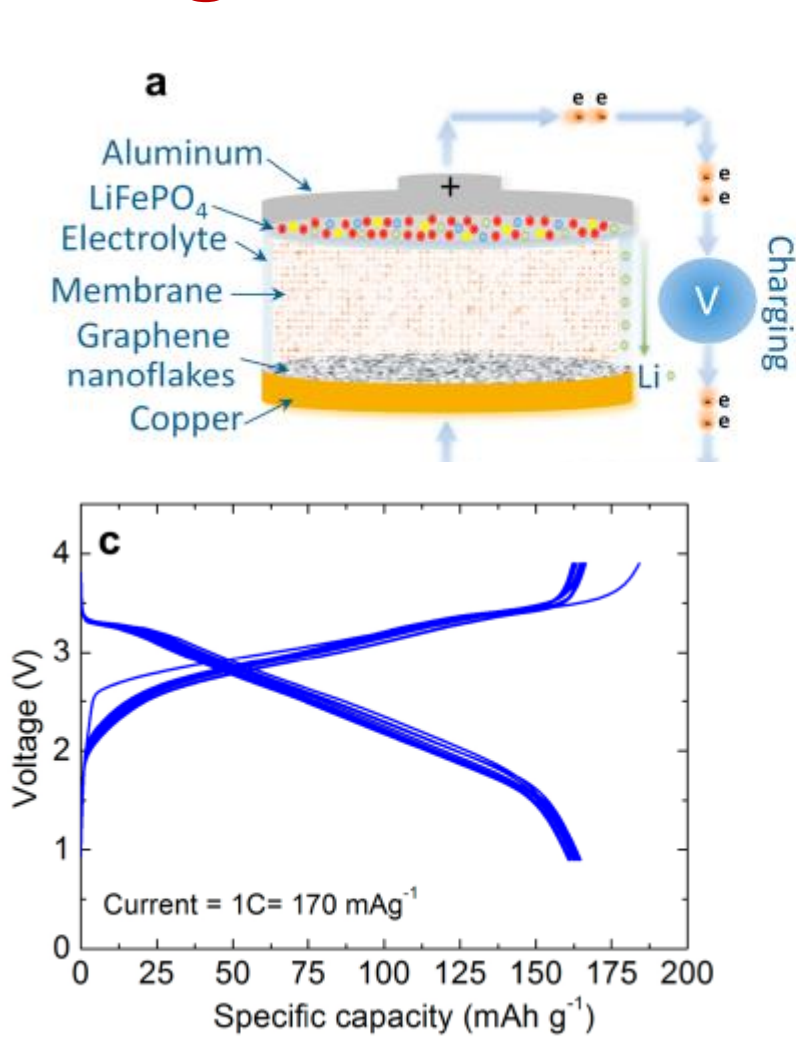


- Alta conduttività elettrica
- Alta area superficiale specifica
- Alta porosità

M. Riccò, D. Pontiroli, J. A. Stride et al, Nano Lett. 11, 4919 (2011)

M. Gaboardi, D. Pontiroli et al, J. Mater. Chem. A 2, 1039 (2014)

Il grafene nelle batterie al litio

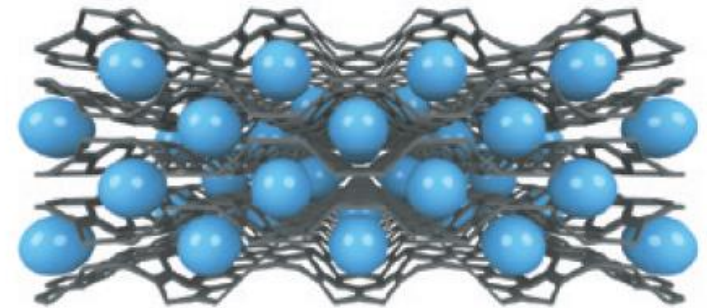
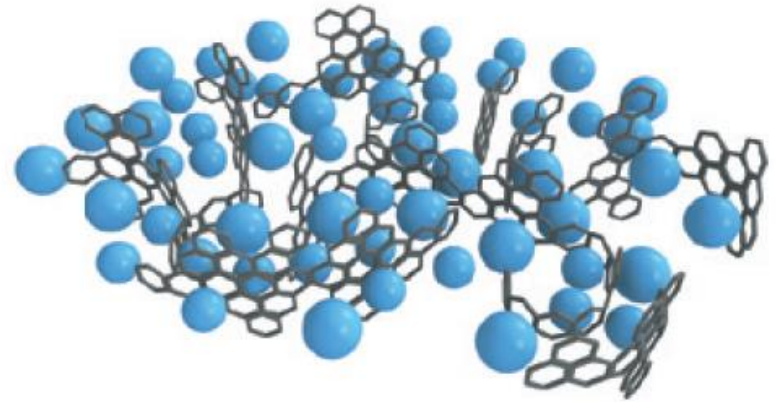


J. Hassoun et al., Nano Lett. 14, 4901 (2014)

Il grafene nelle batterie al litio

Il grafene è anche efficace per **formare compositi** con i materiali attivi che formano gli elettrodi delle batterie (catodi)

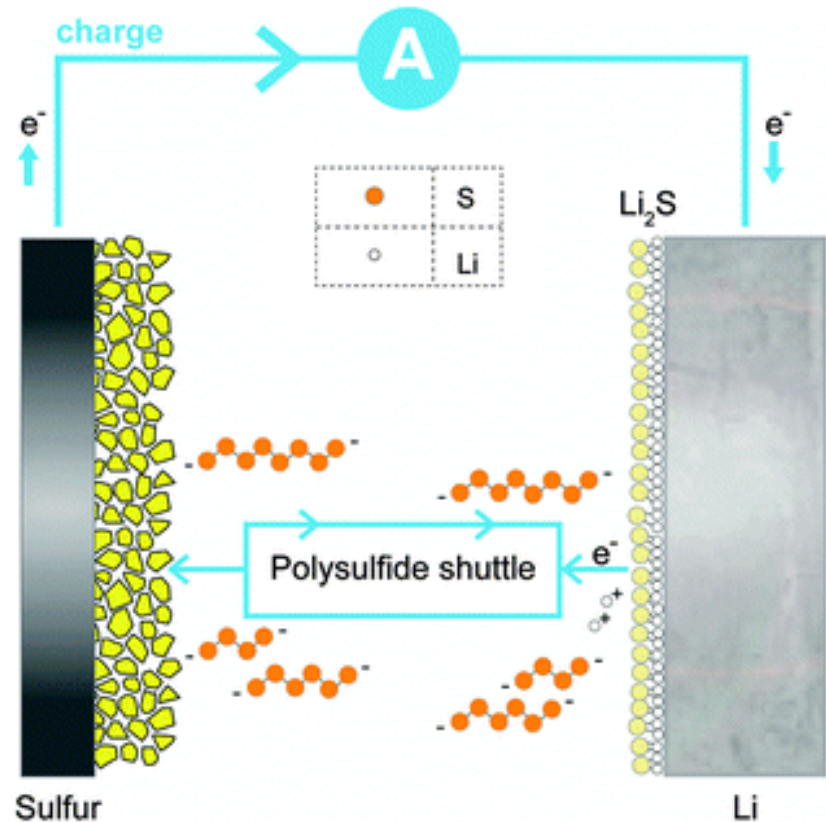
- ✓ Aumenta la **conducibilità elettronica** dell'elettrodo favorendo l'estrazione delle cariche
- ✓ Fornisce **robustezza meccanica** all'elettrodo
- ✓ **Limita le rotture** dovute all'espansione e contrazione dell'elettrodo durante l'intercalazione/deintercalazione
- ✓ Il nanoconfinamento del materiale attivo favorisce la **migrazione ionica**



R. Raccichini et al., Nat. Mater. 14, 271 (2015)

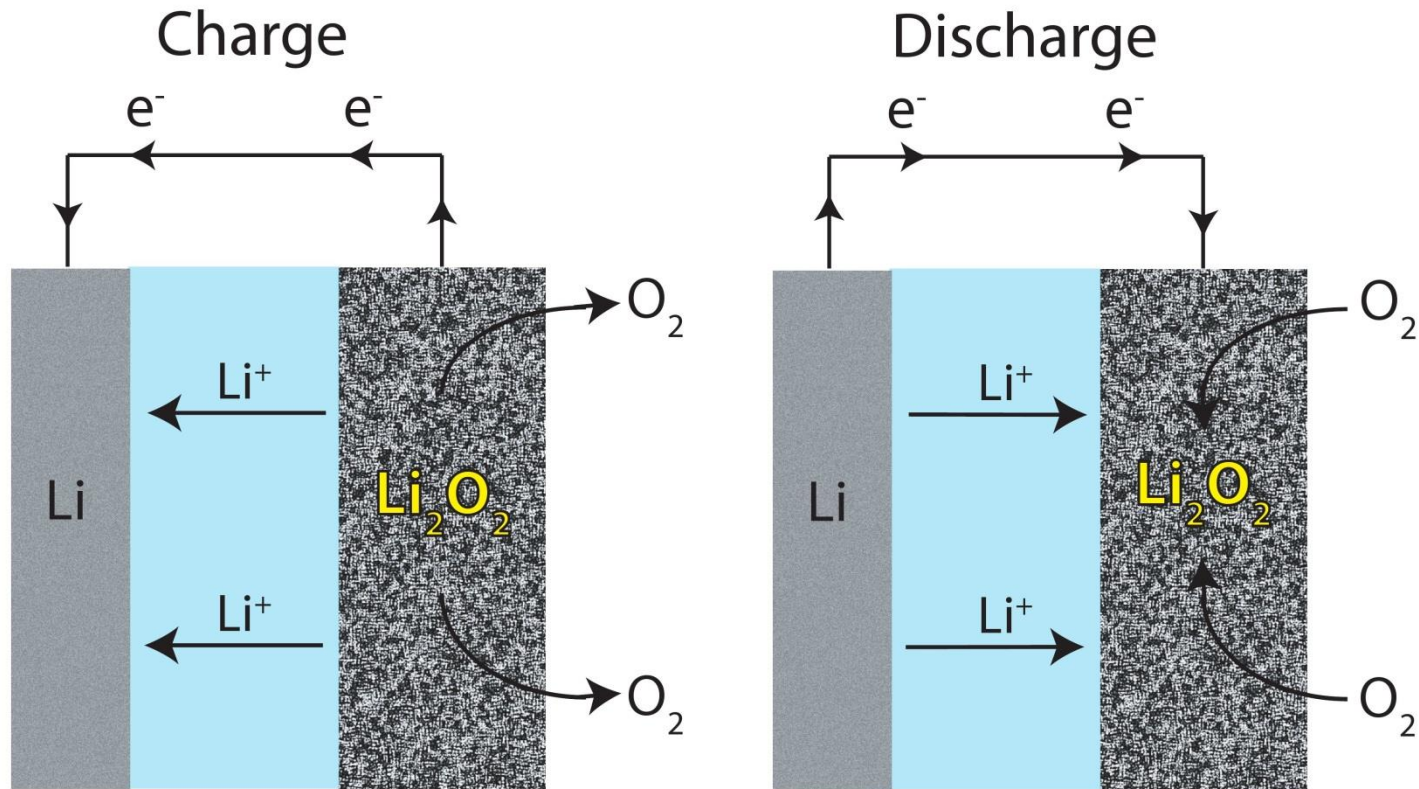
Le batterie Li-S

- ✓ Sono formate da un elettrodo negativo in Li accoppiato ad un elettrodo positivo in zolfo, separati da un elettrolita. Presentano **elevata energia specifica (2600 Wh/kg)** e **capacità (1675 mAh/g)** rispetto alle tradizionali batterie al Li
- ✓ Non sono ancora commercializzate perchè presentano dei **problemi tecnologici**: espansione del catodo dovuta all'intercalazione con Li e meccanismi di “**shuttling**”
- ✓ L'uso del **grafene** può limitare questi effetti (es. nano-compositi grafene – zolfo e ricoprimento con graphene-ink)



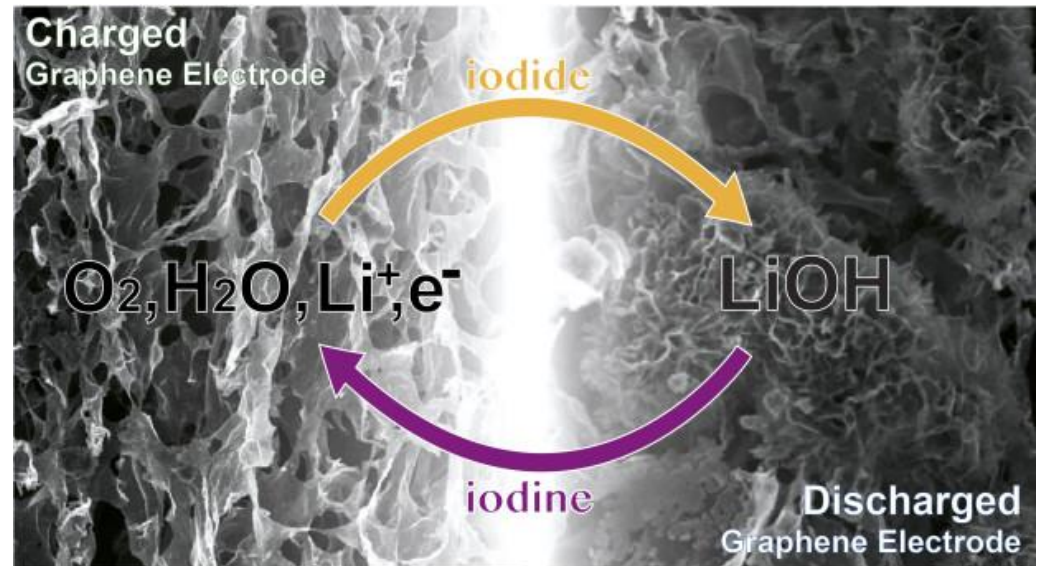
N. Li et al. Chem. Commun. 48, 4106 (2012)

Le batterie litio-aria



- ✓ Hanno l'energia specifica **più alta possibile**: teorica 12 kWh/Kg, confrontabile con la benzina (13 kWh/Kg)! Nella pratica 1.7 kWh/Kg, 5 volte maggiore delle batterie commerciali
- ✓ Problemi di reversibilità e durata. Sensibilità all'umidità

Grafene nelle batterie Litio-aria (Li-O₂)



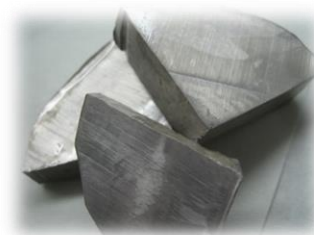
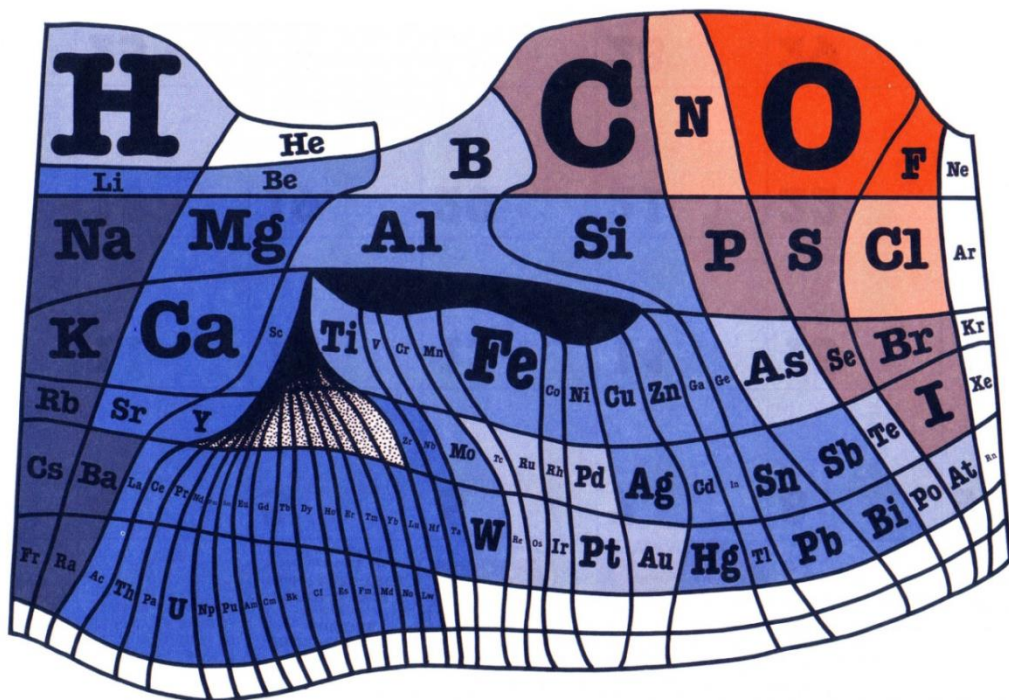
- ✓ Anodo in Li, catodo in rGO con porosità «gerarchica»
- ✓ Capacità : 25000-40000 mAh/g

T. Liu et al., Science 350, 530 (2015)

Alternative al litio?

Il litio in natura è poco abbondante (circa 20 ppm della crosta terrestre) e non basterebbe nel caso di applicazioni delle batterie in larga scala

Possibili alternative



Na +



Mg 2+



Al 3+

Batterie Na-ion

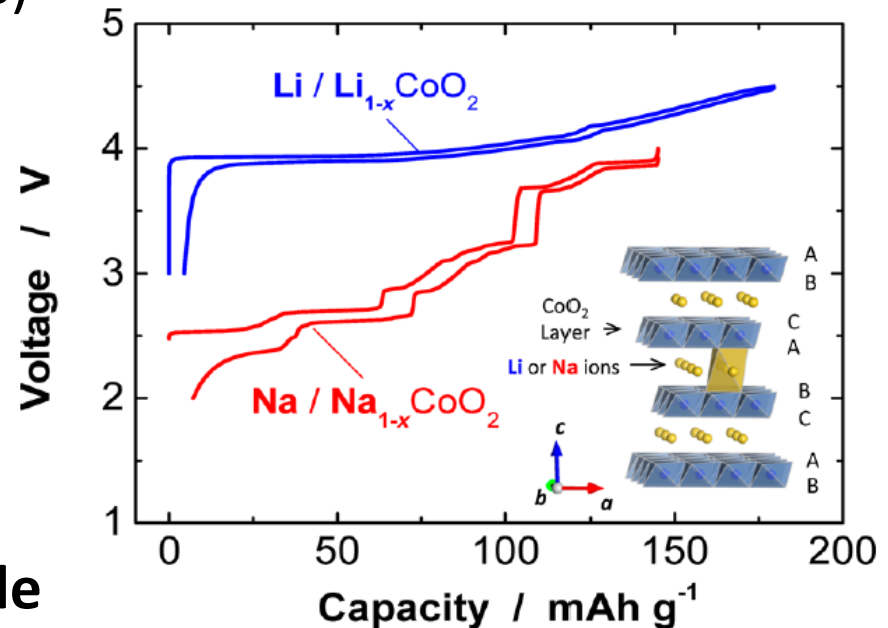
Le batterie Na-ion sono tra le più promettenti per le applicazioni su larga scala (automobili, smart grids)

- ✓ Il sodio è molto più disponibile in natura del litio
- ✓ La tecnologia Li-ion può essere in parte recuperata per assicurare un rapido sviluppo

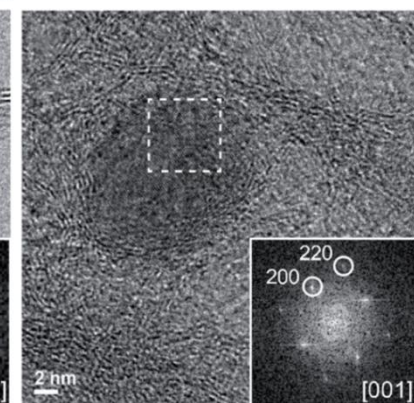
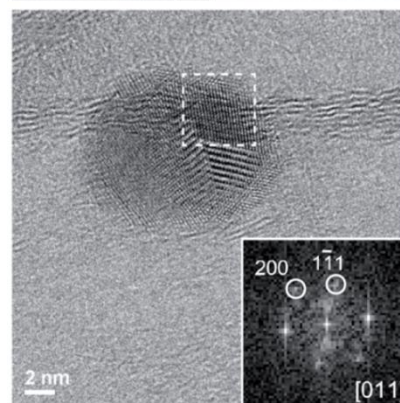
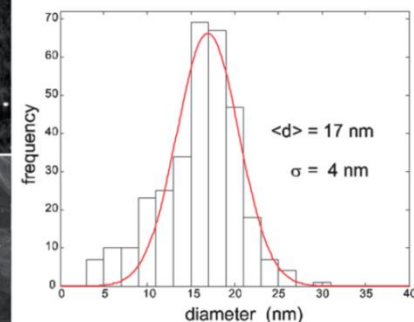
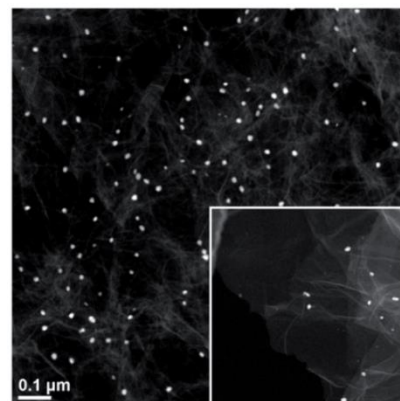
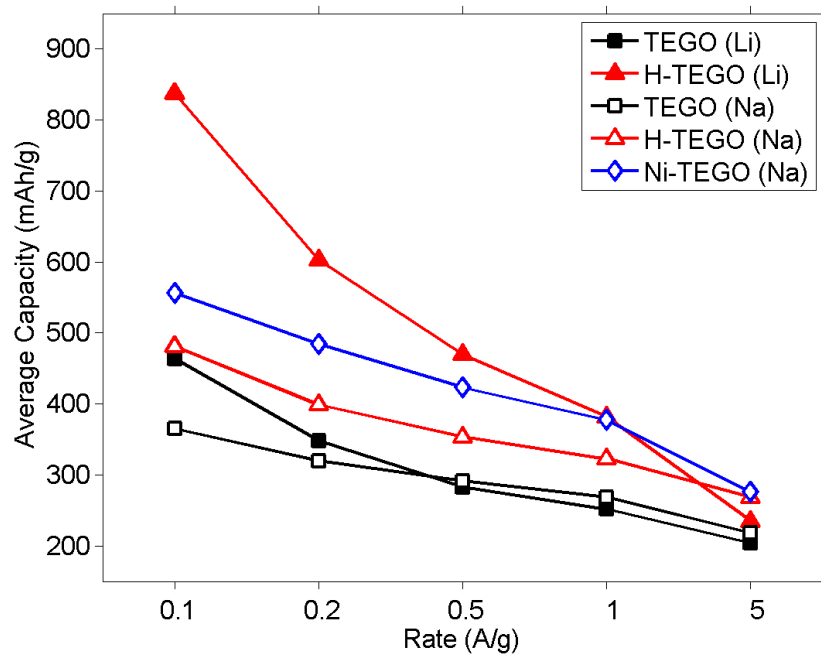
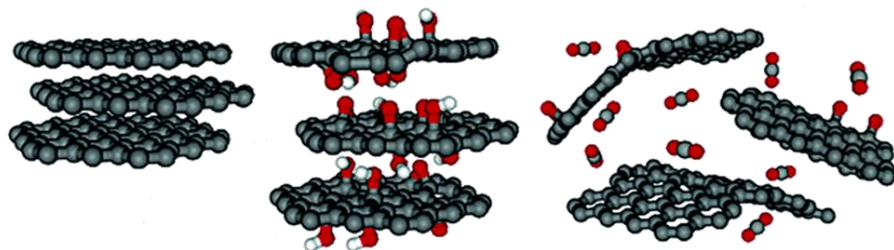
Ma...

... di fatto queste batterie sono ancora ad uno **stadio embrionale**

- ✓ Motivo “storico”: questo tipo di batterie è stato considerato all’inizio a torto molto meno efficiente della tecnologia Li-ion e non si è investito su di esso
- ✓ Servono nuovi materiali, in particolare nuovi anodi, perchè **il Na non si intercala nella grafite**



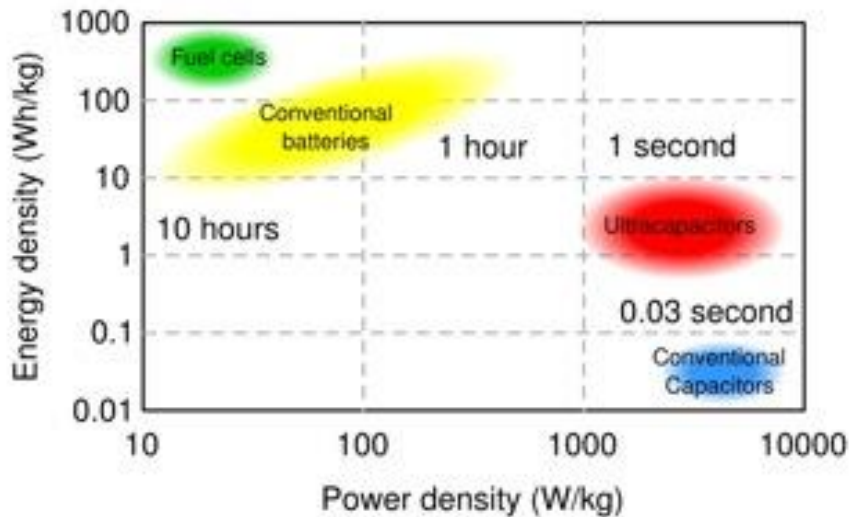
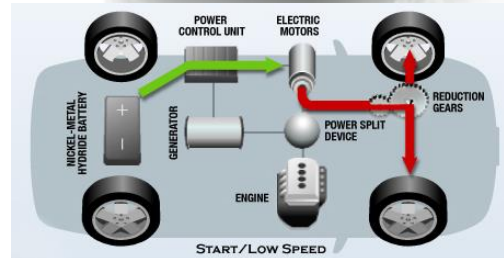
Grafene e batterie al sodio



J. C. Pramudita, D. Pontiroli et al., ChemElectroChem 2, 600 (2015)

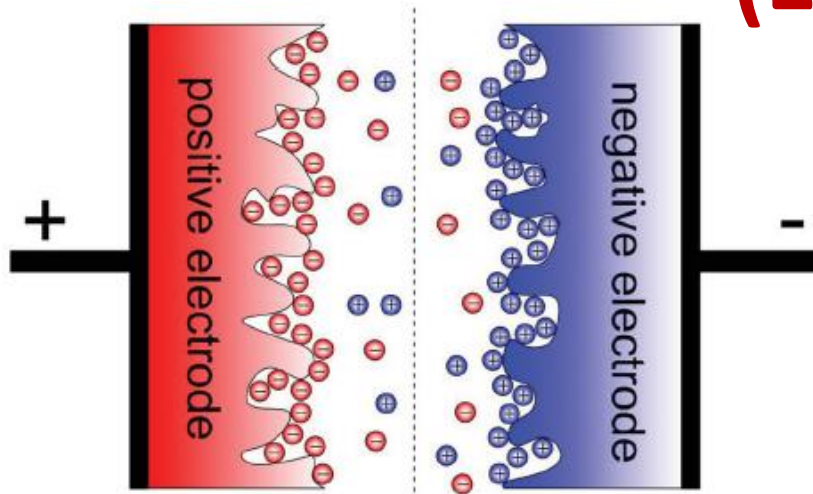
Supercondensatori

I supercondensatori



- ✓ Elevata capacità rispetto ad un normale condensatore
- ✓ Elevata potenza erogabile rispetto ad una batteria (**energy harvesting**)
- ✓ Funziona per milioni di cicli

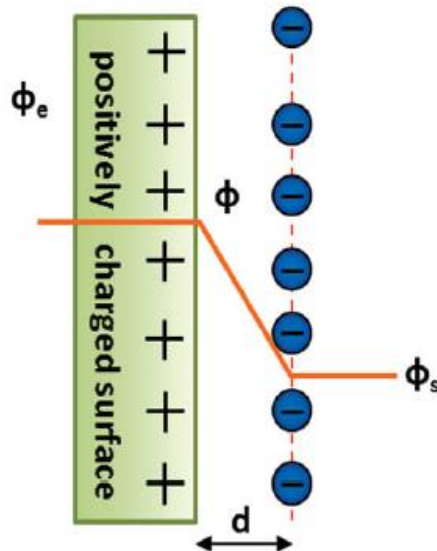
Electrical Double Layer Capacitors (EDLCs)



- ✓ Si basano sull'**accumulo elettrostatico reversibile** di cariche su una superficie **altamente porosa** (elevata area superficiale) che forma gli elettrodi
- ✓ I due elettrodi sono separati da un **elettrolita** in cui sono disciolti gli ioni

Modello di Helmholtz

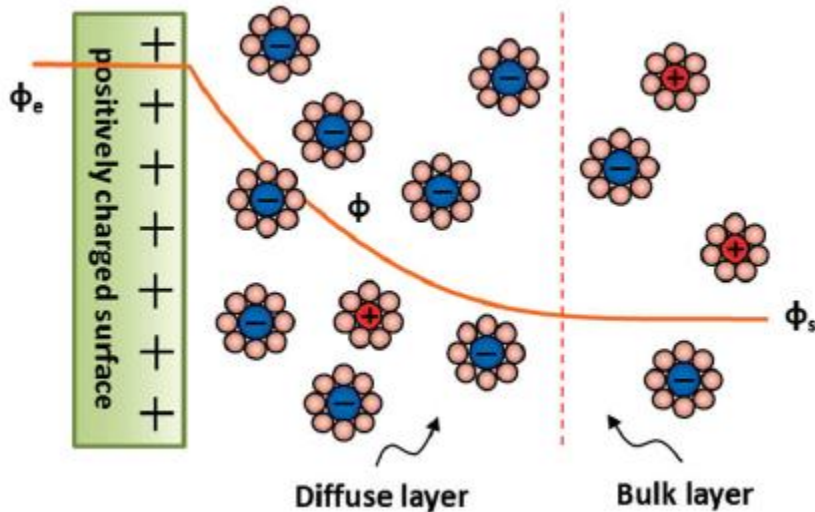
- ✓ Ioni di segno opposto diffondono attraverso l'elettrolita e formano uno strato con uno spessore di pochi nm



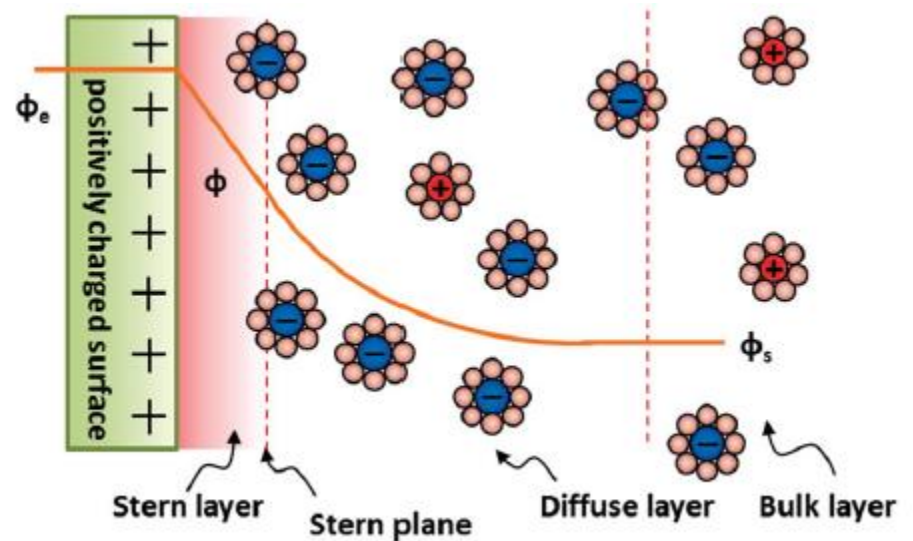
$$C_H = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

EDLCs

Modello di Gouy-Chapman



Modello di Stern



- ✓ Descrivono meglio la fisica del supercondensatore

$$\frac{1}{C_{DL}} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_D}$$

Elettroliti per supercondensatori

✓ Energia Specifica: $E_s = \frac{C \cdot V_{MAX}^2}{2 \cdot 3600 \cdot m}$

✓ Potenza Specifica: $P_s = \frac{V_{MAX}^2}{4 \cdot R_{ES} \cdot m}$



Per questo serve un'ampia finestra di stabilità elettrochimica

Elettroliti per supercondensatori

- ✓ **Elettroliti acquosi:** alta conducibilità (1 S/cm), stretta finestra di stabilità elettrochimica (1.23 V)

Elettroliti acidi (H_2SO_4)

Elettroliti alcalini (KOH)

- ✓ **Elettroliti organici:** minore conducibilità, ma più grande stabilità (2.7 – 2.8 V)

Acetonitrile o propilene carbonato in cui sono disciolti sali quaternari di ammonio (TEA- BF_4)

- ✓ **Sali liquidi (liquidi ionici):** Sali liquidi a RT, alta stabilità (oltre 3 V), assenza di solvatazione
1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (BMIM BF_4)



Elettroliti per supercondensatori

- ✓ **Elettroliti gel:** bassa conducibilità, ma formano uno strato protettivo sul dispositivo. Adatto a geometrie planari

Esempio: H_2SO_4 in H_2O -PVA (polivinil alcol)

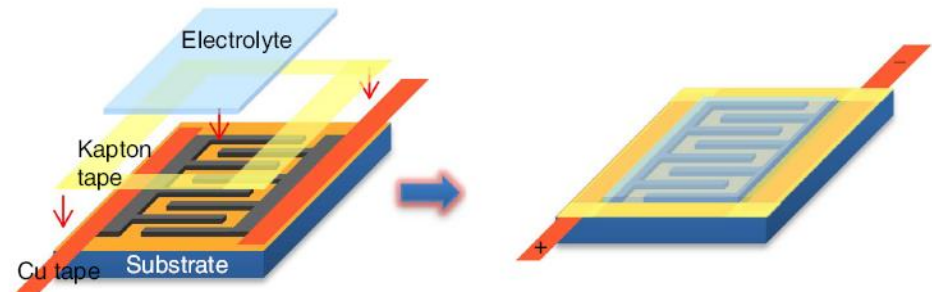
Soluzione di H_2SO_4 in H_2O



Aggiunta di PVA in polvere



Formazione del gel a 85 °C



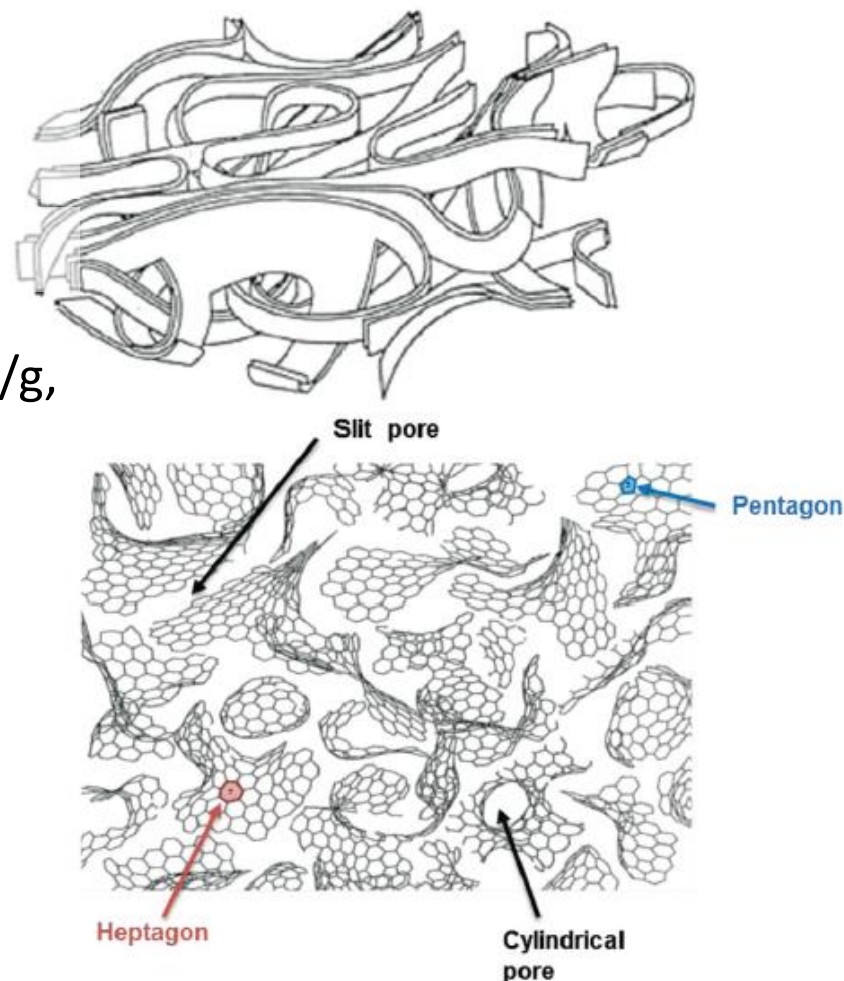
Elettrodi per supercondensatori

- ✓ Materiali **altamente porosi** prevalentemente a base di **carbonio attivato**
- ✓ Carbonio **non grafitizzabile**
- ✓ Elevate aree superficiali (oltre 3000 m²/g, cnf. grafene, 2630 m²/g)
- ✓ Struttura porosa «gerarchica»:

Macropori (>50 nm)

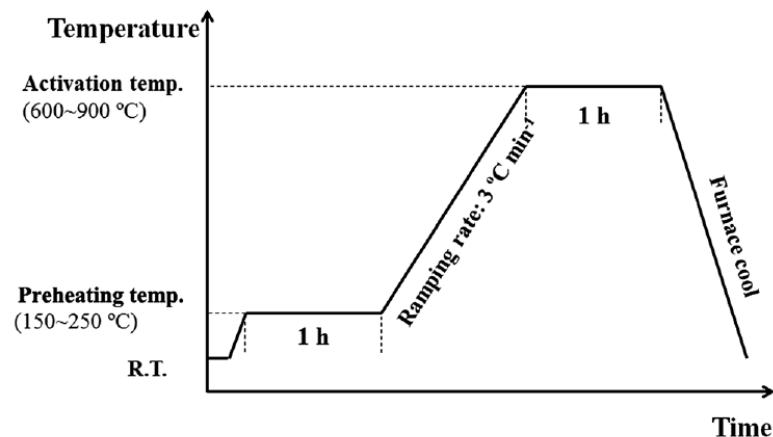
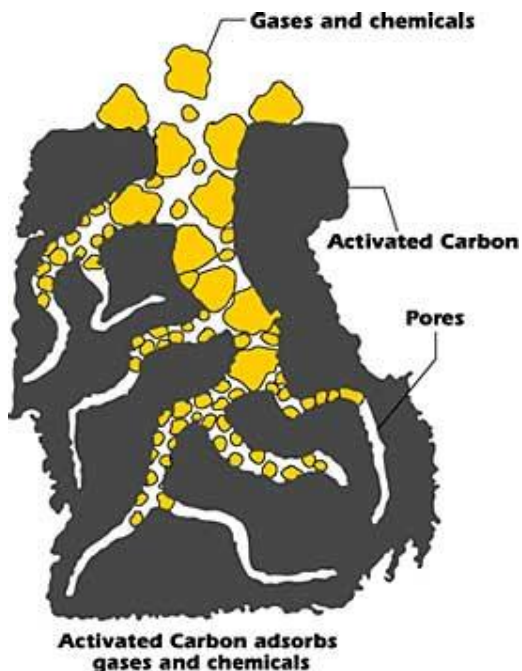
Mesopori (tra 2 e 50 nm)

Micropori (<2 nm)



Attivazione del carbonio

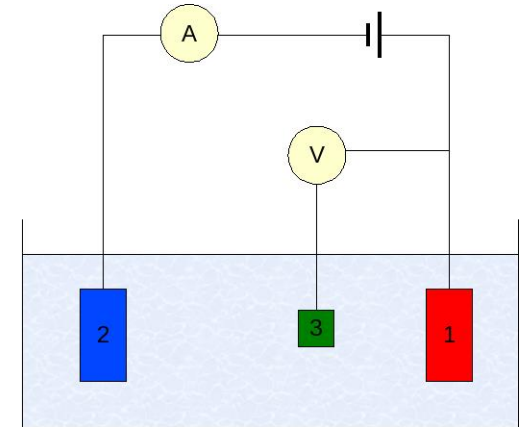
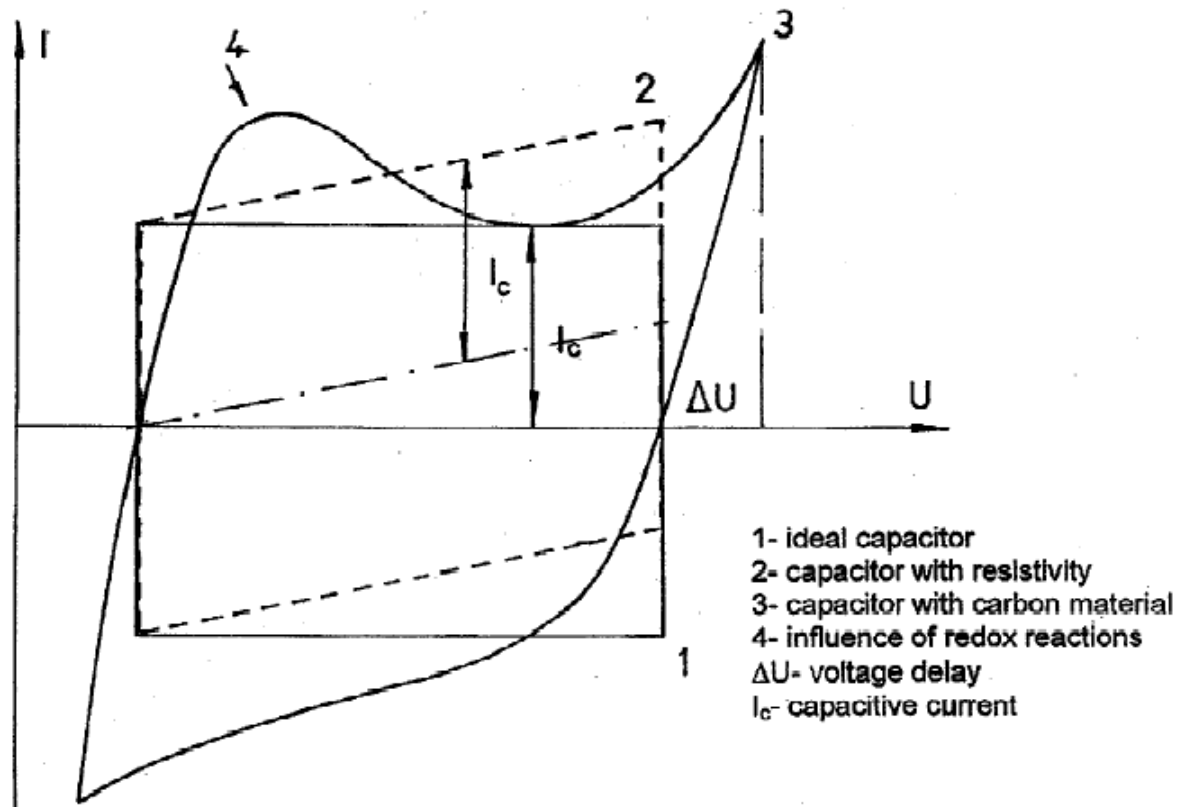
- ✓ Il processo di attivazione del carbonio avviene facendo reagire materiali di carbonio (solitamente ottenuti per pirolisi di materiali organici, come scarti di cibo, legname, noci di cocco) con **KOH**



- 1) $2C + 6KOH \rightarrow 2K + 3H_2 + 2K_2CO_3$ Etching
- 2) $2K_2CO_3 \rightarrow K_2O + CO_2$ Decomposition
- 3) Lavaggio con HCl

Caratterizzazione di un supercondensatore

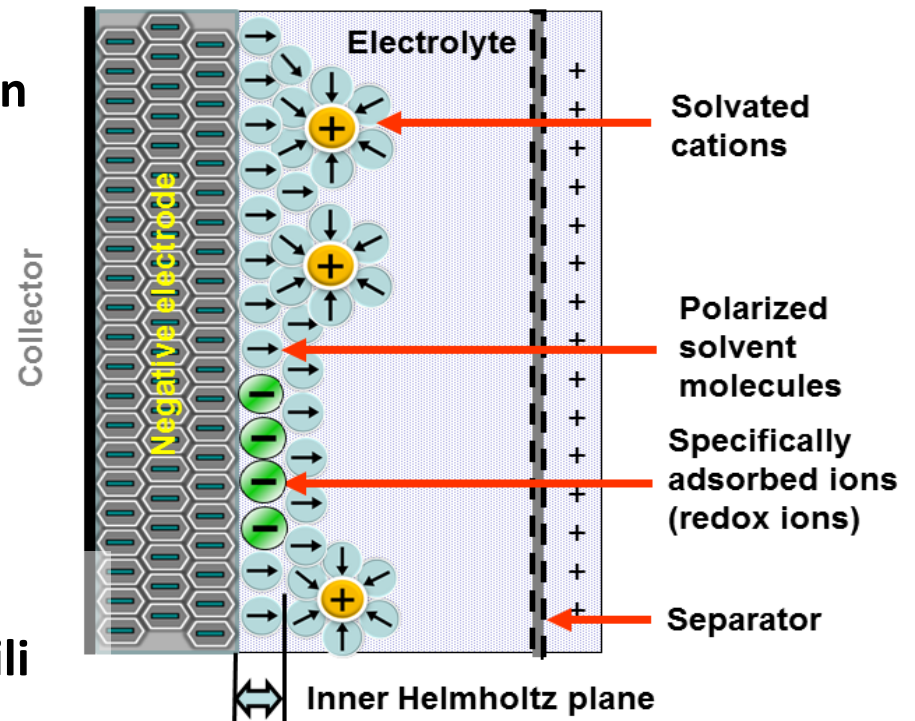
Caratterizzazione ciclovoltammetrica



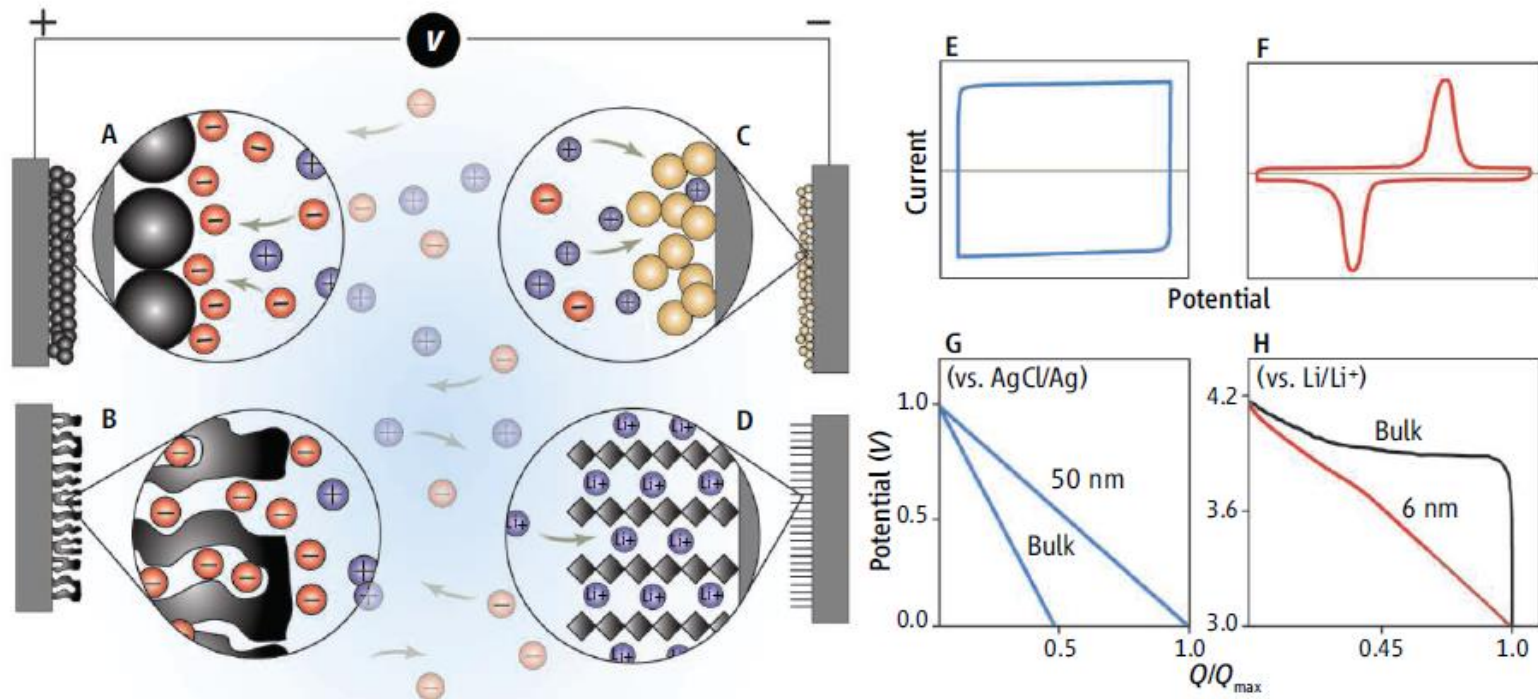
$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\frac{dQ}{dt}}{\frac{dV}{dt}} = \frac{I}{S}$$

Pseudocapacità

- ✓ Nonostante l'ottimizzazione della porosità degli elettrodi (dimensione dei pori e volume totale dei pori) **la capacità massima raggiungibile da un EDLC è limitata**
- ✓ Esistono fenomeni pseudocapacitivi (reazioni redox) capaci di aumentare **fino a 100 volte** la capacità del supercondensatore
- ✓ La «pseudocapacità» origina da una veloce sequenza di **reazioni reversibili redox** (faraidiche), in particolare **processi di intercalazione e/o assorbimento** sulla superficie degli elettrodi



Dove finiscono le batterie e iniziano i supercondensatori?

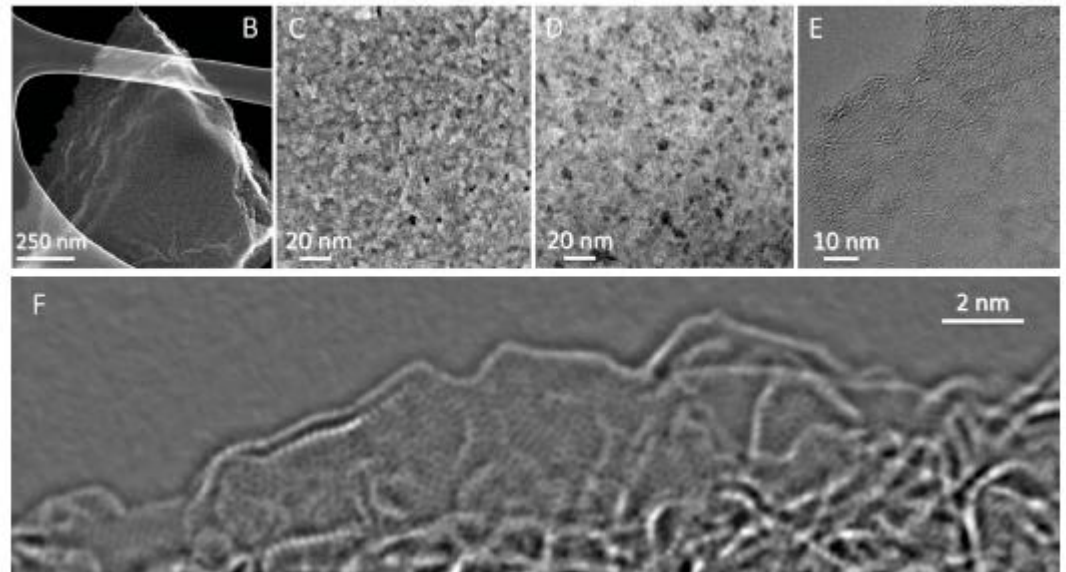


P. Simon et al., Science 343, 1210 (2014)

Supercondensatori basati sul grafene



- ✓ Grafene prodotto per trattamento in MW di GO (MEGO)
- ✓ Attivazione con KOH (SSA = $3100 \text{ m}^2/\text{g}$) permette di ottenere strutture sp^2 3D
- ✓ Capacità di 166 F/g con l'uso di IL come elettroliti



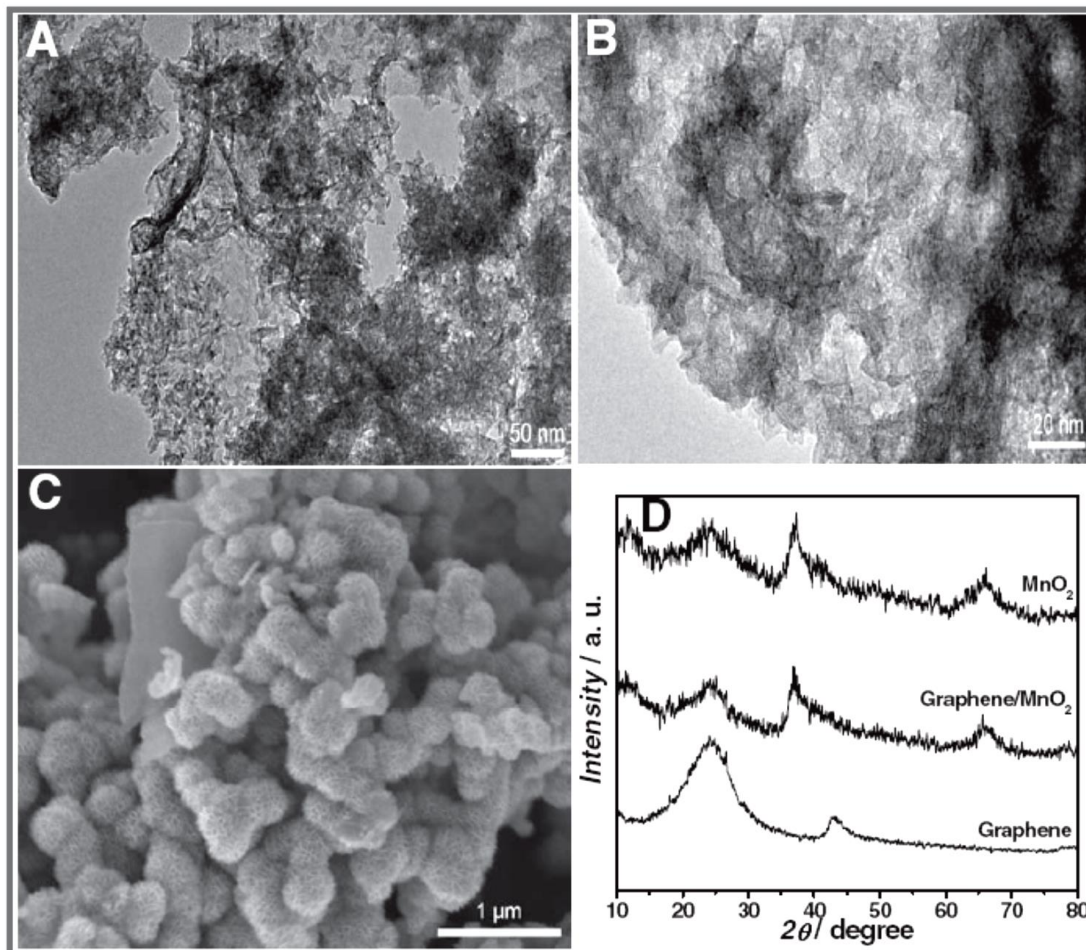
Y. Zhu et al., Science 332, 1537 (2011)

Pseudocapacità e grafene

Elettrodo **composito**

MnO₂/grafene (elettrolita: soluzione acquosa di NaSO₄):

- ✓ Il grafene presenta una **elevata SSA** e funge da EDLC
- ✓ I nanocristalli di MnO₂ fungono da elemento **pseudocapacitivo** in grado di intercalare gli ioni Na⁺ attraverso un **processo red-ox**

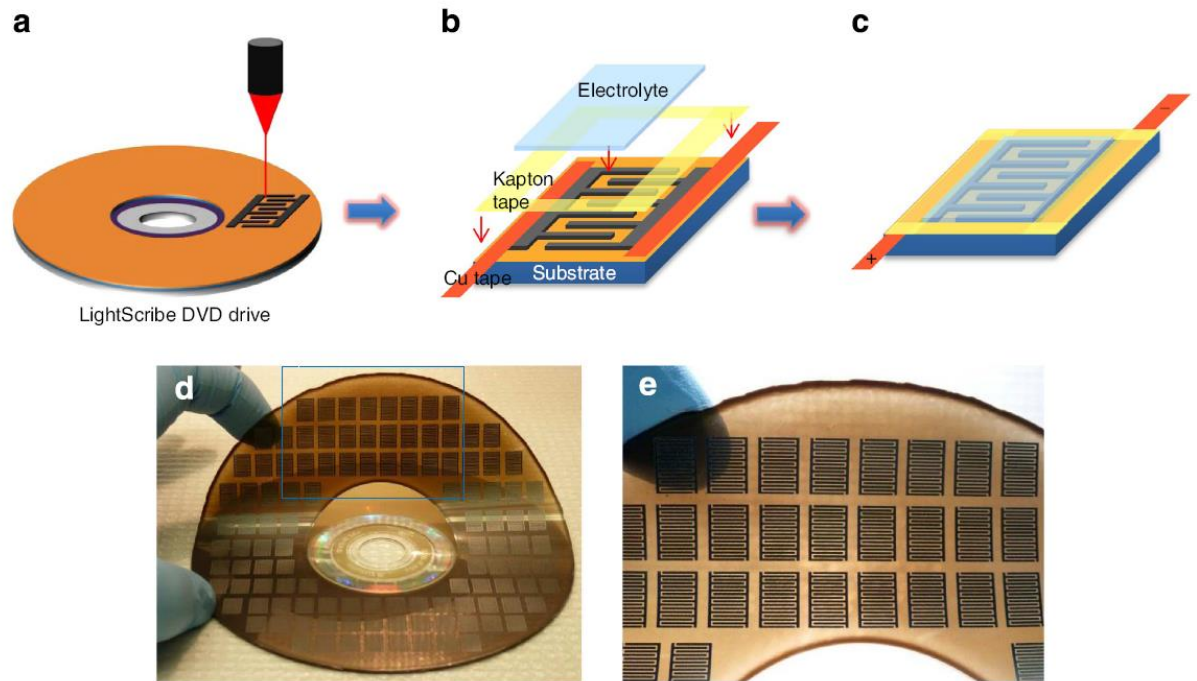


Z. Fan et al. *Adv. Funct. Mater.* 21, 2366 (2011)

Grafene prodotto con il laser per energy-harvesting

GO viene disperso su foglio di PET e convertito in grafene mediante il **laser di un masterizzatore** (pochi mW)!

- ✓ **Elevata riproducibilità e scalabilità** grazie alla precisione del laser
- ✓ I dispositivi sono **supercondensatori interdigitati planari** su cui viene depositato l'elettrolita (gel a base di PVA)

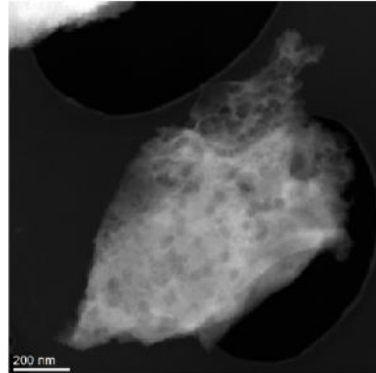


M. F. El-Kady et al. Nat. Comm. 4, 1475 (2013)

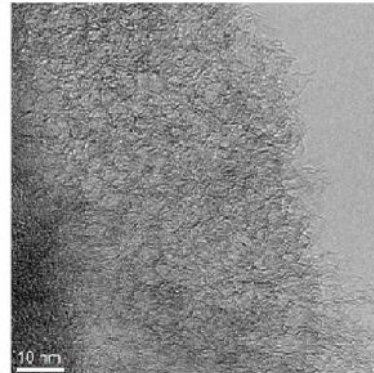
Supercondensatori dai pollai?



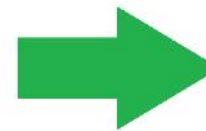
Poultry Litter



Super-Activated Carbon

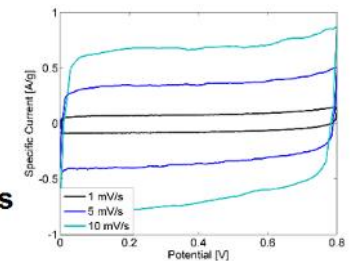
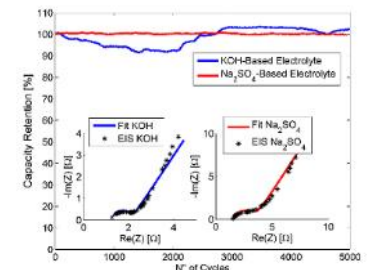


Carbonization and Activation



Binder-free Electrodes

High-Performance Biocompatible Supercapacitors



D. Pontiroli et al., *Microporous Mesoporous Mater.* 285, 161-169 (2019)

Laboratorio di Nanostrutture di Carbonio



UNIVERSITÀ
DI PARMA

Laboratorio di **NANO**strutture
di **C**arbonio



✓ Ricerca su batterie innovative

Nanostrutture di carbonio per
batterie innovative

- ✓ New anodes for Li-ion and Na-ion batteries
- ✓ Solid electrolytes

Nanostrutture di carbonio per
supercondensatori

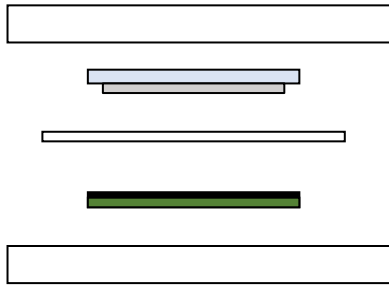
- ✓ Bio-Char derived EDLC electrodes
- ✓ Decorated-graphene with redox activity
- ✓ Graphene-based laser printed supercapacitors





Esperienza di Laboratorio

- Assemblaggio batteria



Li (anode)

Separator + Electrolyte

Carbon (cathode)



- Misura di tensione
con tester



Bibliografia

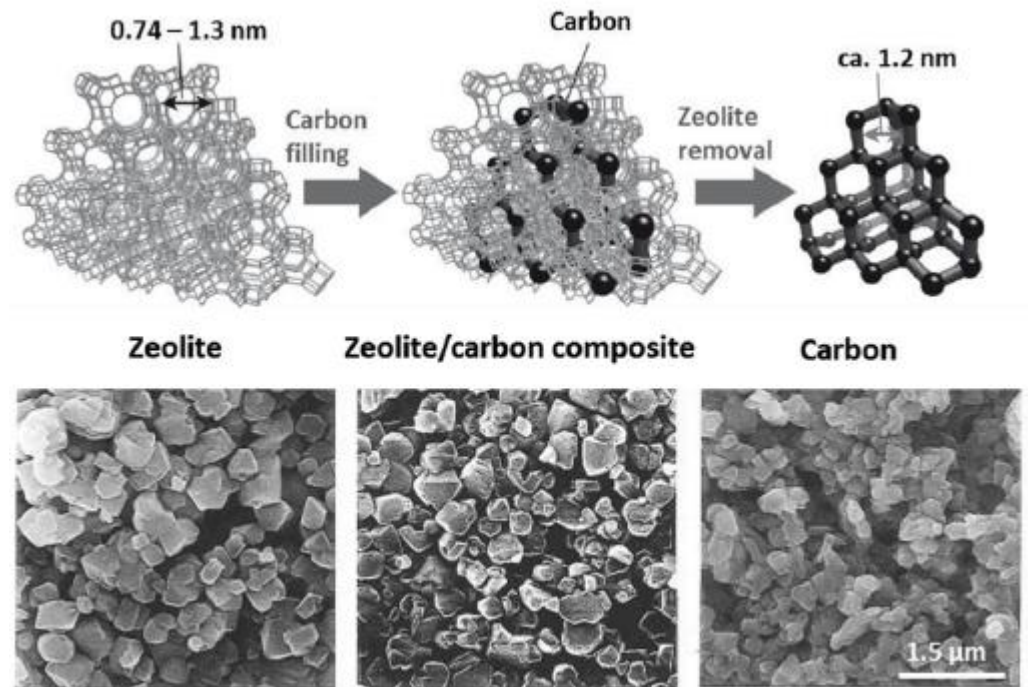
J. O. Besenhard, “Handbook of Battery Materials”, Wiley-VCH (1999)

M. Yoshio, R. J. Brodd, A. Kozawa, “Lithium-Ion Batteries”, Springer (2009)

F. Beguin, V. Presser, A. Balducci, E. Frackowiak, «Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors” Adv. Mater. 26, 2219 (2014)

Uso di templanti per controllo dei pori

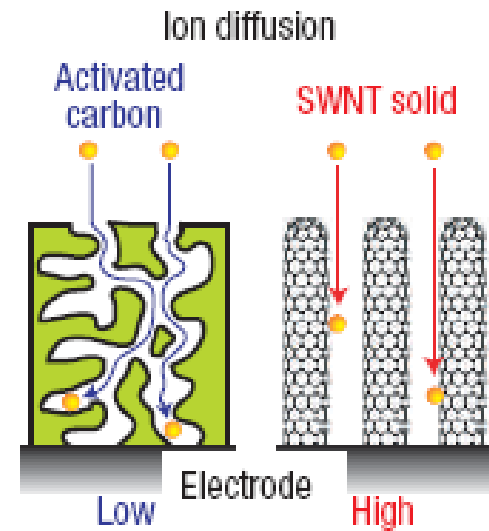
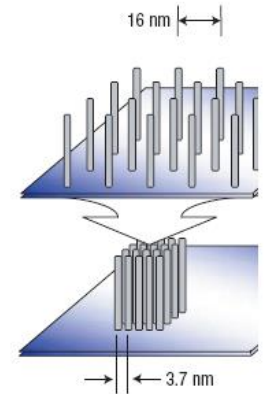
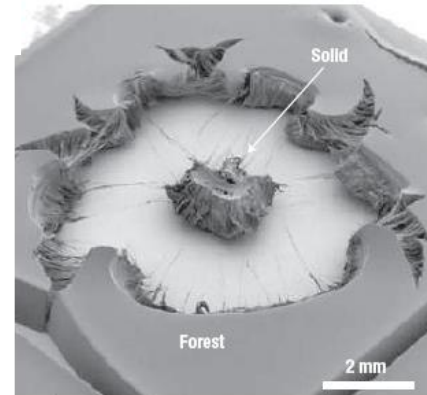
- ✓ Uso di zeoliti come templanti per controllare le dimensioni dei pori della nanostruttura di carbonio
- ✓ La zeolite viene quindi rimossa lasciando la struttura di carbonio porosa
- ✓ SSA = 2000 m²/g e capacità di 100-190 F/g



T. Kyotani et al. Chem. Mater. 9, 609 (1997)

Elettrodi basati su SWCNTs

- ✓ Foreste di SWCNT ottenute per «liquid collapse»
- ✓ Gli ioni dell'elettrolita sono in grado di diffondere efficacemente attraverso i tubi
- ✓ SSA = 1300 m²/g. Buone performances, ma alti costi di produzione



D. N. Futaba et al., Nat. Mater. 5, 987 (2006).

