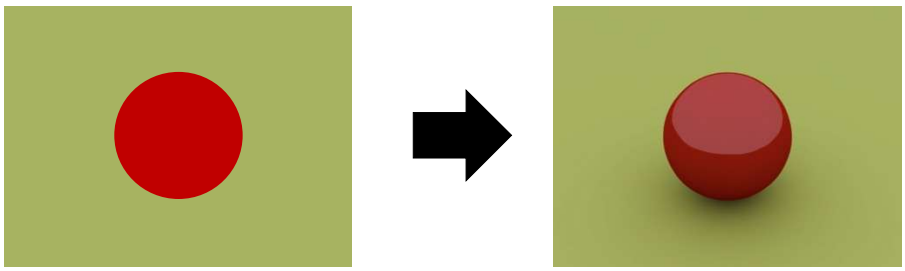
Marco Tarini - Computer Graphics 2025/2026
Università degli Studi di Milano

Lighting

1

Lighting



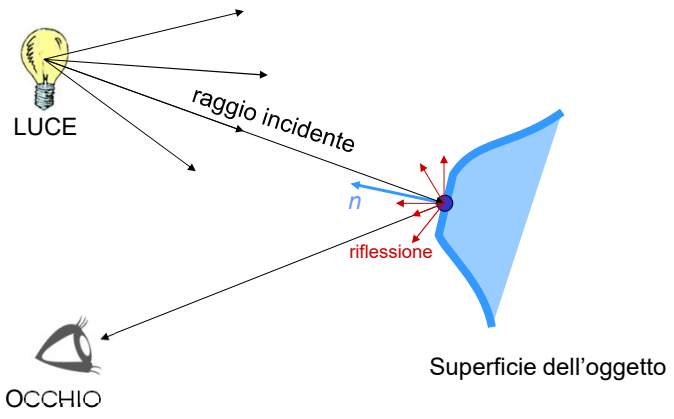
2

Lighting: intro

- ✓ Dopo la transform, il task principale del rendering
- ✓ Ci proponiamo di simulare una serie di fenomeni reali di interazione fra
  luce (radiazione elettromagnetica) e
  scena (come insieme di superfici)
- ✓ Il task, in concreto: determinare il **colore RGB** del pixel da generare ad ogni frammento
  - ⇒ In funzione di dati come:
    1. la normale locale della superficie
    (l'orientamento del pezzetto di superficie che rappresenta)
    2. L'illuminazione presente nella scena
    (come insieme discreto di luci, vedremo in che modo)
    3. Il «materiale» di cui è composto questo pezzetto di sup

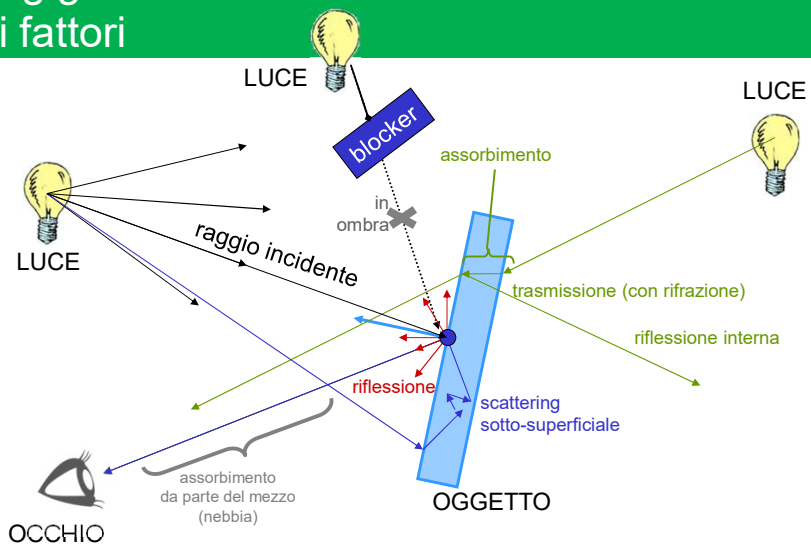
3

Lighting **locale**:
sorgente di luce → surface → occhio (e nient'altro!)



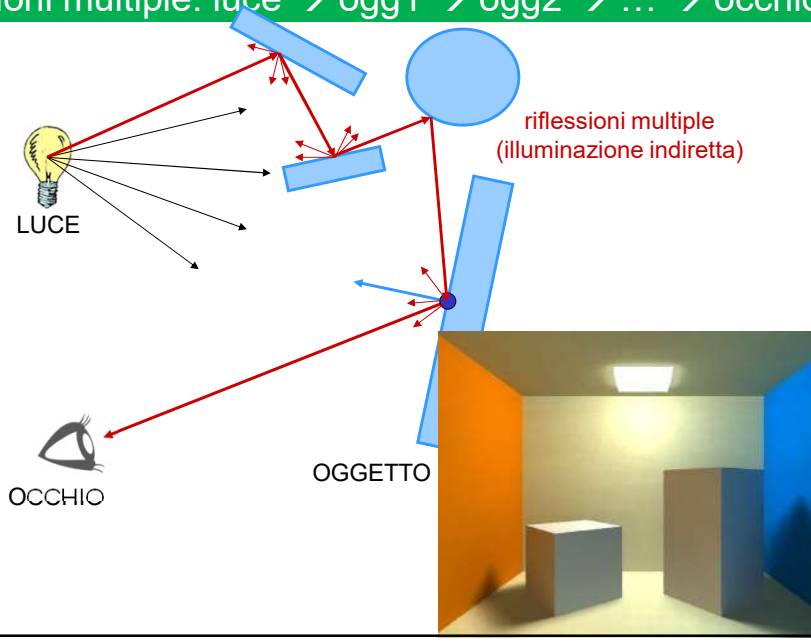
5

Lighting globale: alcuni fattori



6

Lighting globale: riflessioni multiple: luce → ogg1 → ogg2 → … → occhio



7

Lighting: globale VS locale

Illuminazione locale

Consideriamo solo:

- ⇒il frammento di superficie da illuminare
- ⇒a sua posizione, orientamento (normale) e materiale
- ⇒la direzione di osservaz
- ⇒la fonte (o le fonti) di luce

Caso particolare e semplificato, ma facile da ottenere anche con l'approccio rasterization-based

Illuminzione globale

Comprende fenomeni come

- ⇒riflessioni multiple
- ⇒ombre portate
- ⇒scattering sottosuperficiale
- ⇒rifrazione
- ⇒...

Realistica, ma richiede algoritmi specializzati (che non vedremo)

8

Materiali in CG

- ✓ In CG, il "materiale" è un modello matematico che descrive in che modo una data superficie reagisce alla luce, e comprende cose come
  - ⇒ Quanto appare chiaro oppure scuro (quando illuminato da una data luce)
  - ⇒ Di che colore si presenta (quando illuminato)
  - ⇒ Quanto è lucido, oppure opaco («opaco» nel senso di «privo di riflessi lucidi», detti highlight)
  - ⇒ Quanto è trasparente, semitrasparente, traslucido, oppure permeabile alla luce
  - ⇒ Se e quanto il materiale è "cangiante"
  - ⇒ Se è fosforescente, se emette luce propria (oltre a riflettere quella di cui è investito), etc
- ✓ (nota: in alcune librerie ad alto livello, come three.js o unity, il materiale è una struttura che descrive quanto sopra, ma anche alcuni settaggi di rendering come quelli relativi a back-face culling, depth test, e l'uso di tessiture etc)

9

Materiali in CG, nel lighting locale

- ✓ Nel lighting locale, il materiale è esaustivamente descritto da una funzione che descrive in che modo la superficie riflette (rimbalza) la luce che la raggiunge da ogni possibile direzione
- ✓ Cioè *quanta* della luce che investe un pezzetto di superficie (da una certa direzione) viene riflessa dalla superficie (in ogni possibile direzione)
  - ⇒ E' una questione probabilistica perché il percorso di ogni singolo fotone non è prevedibile
  - ⇒ Nota: «direzione» = vettore 3D unitario (come sappiamo)
- ✓ Si tratta quindi una funzione che prende in input:
  - ⇒ Una possibile *direzione* di provenienza della luce $\vec{\omega}_i$ (vettore unitario)
  - ⇒ Una possibile *direzione* di uscita della luce $\vec{\omega}_r$ (vettore unitario)

  e restituisce in output (un numero fra 0 e 1):
  - ⇒ Quanta della luce proveniente da $\vec{\omega}_i$ verrà riflessa in $\vec{\omega}_r$
  - ⇒ Settata una direzione, è una distribuzione di probabilità sull'altra

10

La BRDF

- ✓ Questa funzione viene detta **BRDF**
  - ⇒ **B**idirectional *(poiché prende due direzioni, che sono intercambiabili)*
  - ⇒ **R**eflectance *(riflettanza, abilità di riflettere la luce)*
  - ⇒ **D**istribution *(perché è una distribuzione di riflettanza)*
  - ⇒ **F**unction
- ✓ La BRDF descrive in modo esaustivo un materiale (almeno per quello che riguarda il lighting locale)
- ✓ Ad esempio, materiali come…

⇒ Legno	⇒ Oro	⇒ Plastica levigata
⇒ Raso	⇒ Acciaio	⇒ Plastica ruvida
⇒ Stoffa	⇒ Argento	⇒ Vetro
⇒ Pietra	⇒ Cobalto	⇒ Diamante
⇒ Ferro arrugginito	⇒ Seta	⇒ Catarifrangenti
⇒ Velluto	⇒ (superficie dell') Acqua	⇒ etc

sono caratterizzati da BRDF specifiche

11

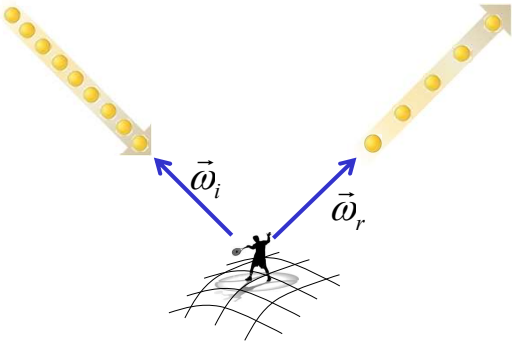
Descrizione di un materiale nel lighting locale: la BRDF

f_r = 

$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$ = su 100  che arrivano a  dalla dir $\vec{\omega}_i$, quante verrano da lui rimbalzate proprio nella dir $\vec{\omega}_r$? (al variare di $\vec{\omega}_i$ e $\vec{\omega}_r$)

fotone = 

Ogni materiale è descritto dalla sua BRDF.
Ad esempio
- metallo cromato
- raso
- legno
- stoffa
- gesso
- carta
- specchio…



Funzione di 4 dimensioni!

(una direzione = 2 dimensioni)

12

Alcuni esempi “estremi” di BRDF
(nessun materiale reale esibisce davvero questo comportamento)

- ✓ La BRDF «tutta 0», perfettamente nera
$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = 0$$
  - ⇒ «da qualsiasi direzione provenga la luce, esattamente 0 di essa verrà riflessa verso ogni possibile direzione»
  - ⇒ Un materiale che assorbe *tutti* i fotoni che riceve
  - ⇒ Materiale reale che si avvicina: «vantablack» →

questa è una foto reale

- ✓ La BRDF perfettamente speculare, che riflette *tutta* la luce che proviene da una direzione $\vec{\omega}_i$ nella direzione $\vec{\omega}_r$, se $\vec{\omega}_r$ è il raggio riflesso $\vec{\omega}_i$ dalla normale $\vec{n}$
  - ⇒ Si può costruire $\vec{\omega}_r$ da $\vec{n}$ e $\vec{\omega}_i$
  - ⇒ Materiale reale che si avvicina: una specchio quasi perfetto →

15

La BRDF costante: materiali “Lambertiani”

- ✓ Per ora occupiamoci di una semplice classe delle BRDF: quelle costanti
  - ⇒ dette puramente diffusive, o Lambertiane (da Lambert, v. dopo)
- ✓ I materiali che esibiscono questa BRDF sono detti diffusivi o Lambertiani
  - ⇒ Esempio di materiali che si avvicinano a questo: gesso, carta ruvida
  - ⇒ (in realtà è sempre solo un’approssimazione)
- ✓ Un materiale Lambertiano riflette la stessa percentuale di luce in tutte le direzioni possibili di uscita, indipendentemente da quale sia la direzione di arrivo della luce
  - ⇒ Quindi è privo di riflessi, esibisce lo stesso colore visto da tutti gli angoli
  - ⇒ Il lighting è *view-independent*: non dipende dalla direzione di luce

16

Materiale Lambertiano (o puramente diffusivo)

- ✓ E’ definito un materiale in cui la BRDF è costante

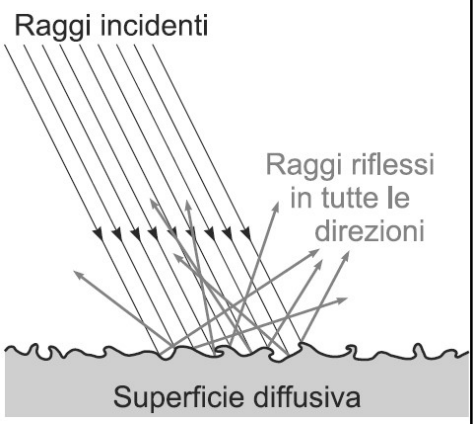
$$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = const$$

- ✓ Detto anche materiale (puramente) diffusivo
  - ⇒ Una superficie di questo materiale riflette la luce da cui è raggiunta *diffondendola uniformemente*
- ✓ La costante è detta l’**albedo** del materiale: il rapporto fra la luce incidente e la luce riflessa
  - ⇒ da 0, materiale perfettamente nero, assorbe tutta la luce (la BRDF «perfettamente nera», quella del «vanta black»)
  - ⇒ a 1, materiale perfettamente bianco, diffonde tutta la luce, senza assorbirne alcuna

17

Materiali «lambertiano» (o diffusivi) reali

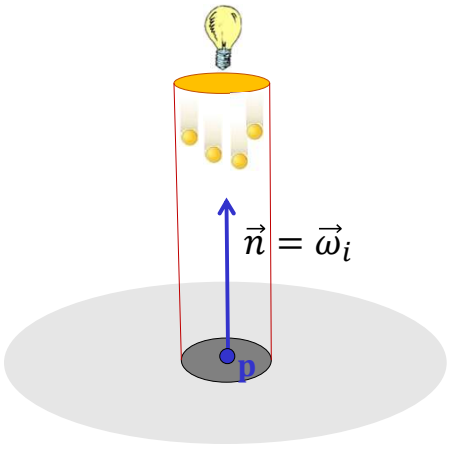
- ✓ Si verificano quando…
  - ⇒ a livello microscopico, la superficie presenta micro-sfaccettature disposte in modo molto irregolare, caotico
  - ⇒ altri fenomeni di interazioni fra fotone e superficie
- ✓ Nota:
  - ⇒ le BRDF dei materiali dipendono dalle forma microscopica della superficie (e altro, come le proprietà elettromagnetiche)



18

Sottoproblema

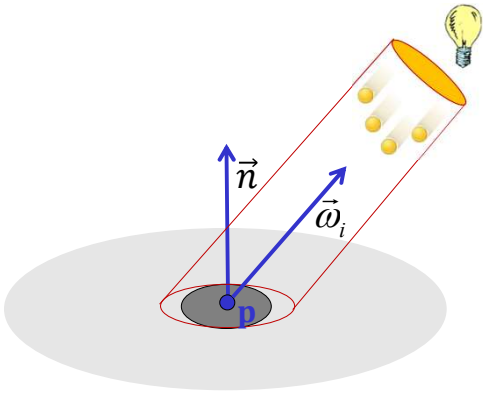
- ✓ Se dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens , quante ne riceve un intorno di $\mathbf{p}$ con normale $\vec{n}$?



20

Sottoproblema

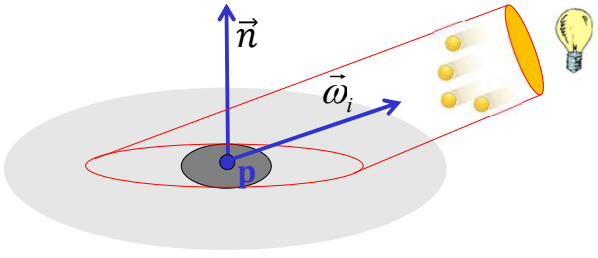
✓ Se dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens ,
quante ne riceve un intorno di $\mathbf{p}$ con normale $\vec{n}_\mathrm{p}$?



21

Sottoproblema

✓ Se dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens ,
quante ne riceve un intorno di $\mathbf{p}$ con normale $\vec{n}$?



22

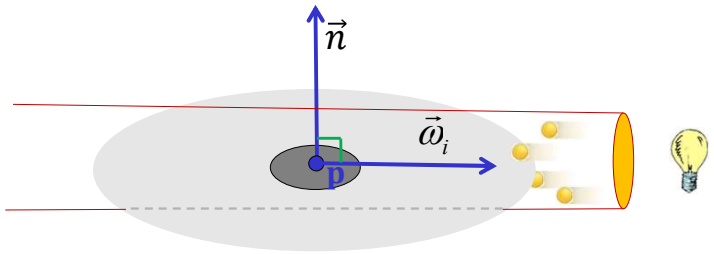
Sottoproblema

✓ Se dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens ,
quante ne riceve un intorno di $\mathbf{p}$ con normale $\vec{n}$?

Caso luce perfettamente radente:

$$(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) = 0$$

nessun fotone colpisce l'intorno



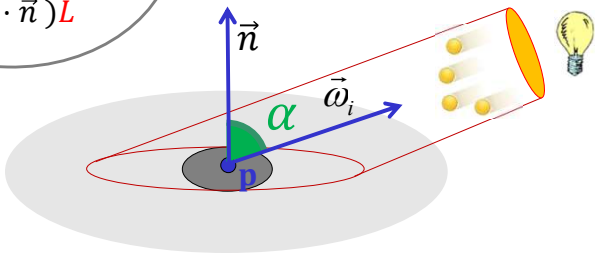
24

Sottoproblema

✓ Se dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens ,
quante ne riceve un intorno di $\mathbf{p}$ con normale $\vec{n}$?

risposta:
("legge del coseno")
$\cos(\alpha)L$
$=$
$(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})L$

Johann
Heinrich
Lambert
1728 - 1777

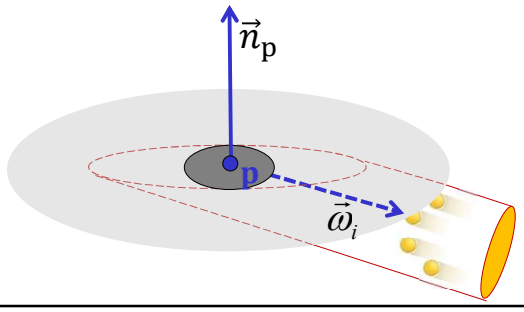


25

Sottoproblema

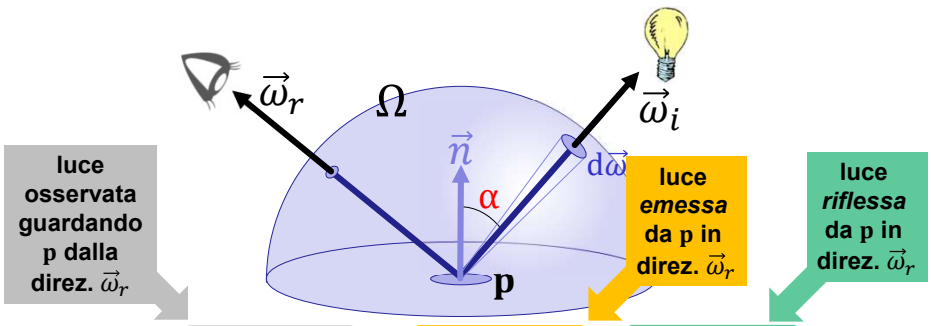
✓ Se dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens ,
quante ne riceve un intorno di $\mathbf{p}$ con normale $\vec{n}$?

Caso luce da dietro:
$(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_\mathrm{p}) < 0$
allora la risposta è 0
(non certo un numero negativo)
perché l'intorno si trova nella sua stessa ombra)



27

Lighting locale in una forma molto generale: l'equazione della radianza



$$L_o(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = L_e(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) + L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r)$$

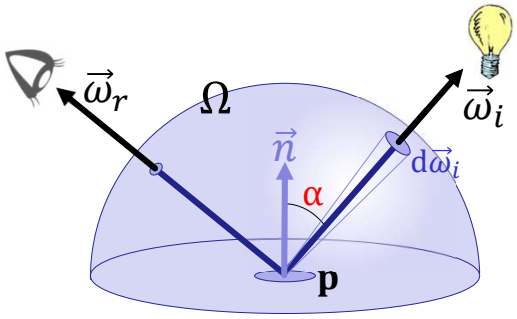
28

Luce emessa e luce riflessa

- ✓ La **luce emessa** è inclusa solo durante il rendering di quei rari oggetti che emettono luce propria
  - ⇒ Ad esempio, nel renderizzare una lampadina led, oppure la superficie il sole in un paesaggio
- ✓ Modella il *percorso* diretto della luce: sorgente → POV (invece che: sorgente → superficie → POV)
  - ⇒ Nota: affinché questa sorgente di luce illumini gli *altri* oggetti, è necessario includerla nella nel fattore $L_i(x, \vec{\omega}_i)$ usato nel calcolo della **luce riflessa** durante il tutti i rendering di questi altri oggetti
- ✓ Questa componente può venire calcolata come una semplice costante, da aggiungere alla luce riflessa
  - ⇒ Oppure tre costanti, una per ciascuno dei tre canali RGB
  - ⇒ Questa è detta «componete emissiva» del modelli di lighting (per es, da `three.js`)
- ✓ Concentriamoci sulla luce riflessa

29

Lighting locale in una forma molto generale: l'equazione della radianza



$$L_o(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = L_e(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) + L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)\, L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)\, \underbrace{\cos(\alpha)}_{(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})}\, d\vec{\omega}_i$$

30

Lighting locale in una forma molto generale: l'equazione della radianza [simboli e spiegazione]

$\mathbf{p}$: punto sulla superficie da illuminare

$\vec{n}$: normale della superficie in $\mathbf{p}$

Ω : insieme di tutte le direzioni possibili di provenienza della luce

⇒ una semisfera unitaria davanti a $\mathbf{p}$

$\vec{\omega}_r$: la direzione verso l'osservatore

⇒ va da $\mathbf{p}$ verso il POV

$\vec{\omega}_i$: una possibile direzione di provenienza della luce $\in \Omega$

⇒ va da $\mathbf{p}$ verso l'esterno

$d\vec{\omega}_i$: un intorno di $\vec{\omega}_i$ (angolo solido)

$L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)$: intensità della luce che raggiunge $\mathbf{p}$ da una data direzione $\vec{\omega}_i$.

Descrive l'**ambiente di illuminazione**

Espressa in quanta luce per angolo solido. Quindi…

$L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)\, d\vec{\omega}_i$: quanta luce arriva verso $\mathbf{p}$ dall'intorno di $\vec{\omega}_i$

$(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$: di questa, quanta viene ricevuta dall'intorno di $\mathbf{p}$ (**legge del coseno**)

$f_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$: di questa, quanta viene riflessa proprio della direzione $\vec{\omega}_r$.

E' la BRDF del punto $\mathbf{p}$. Descrive il **materiale** (nel punto $\mathbf{p}$)

32

Materiali non uniformi

- ✓ In un **materiale non uniforme**, la funzione BRDF è diversa per ogni punto $\mathbf{p}$ sulla superficie: $f_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$
- ✓ Per ora occupiamoci solo di **materiali uniformi**, per i quali possiamo omettere il punto $\mathbf{p}$ che stiamo illuminando: $f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$
- ✓ Nella pratica, possiamo ottenere non uniformità di materiale assegnando valori che codificano la BRDF diversi (come il base color, vedi dopo)…
  - ⇒ per ogni **vertice** della **mesh**, come **attributo**, oppure
  - ⇒ ogni **texel** di una **tessitura** associata alla mesh

Mesh con materiale uniforme

Mesh con materiale non uniforme (la variazione di materale è codificata in una tessitura)

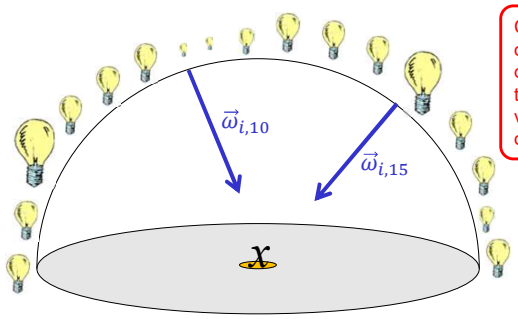
33

Ambiente di illuminazione generico: la luce incidente (da ogni direzione)

- ✓ Per ogni posizione $\mathbf{p}$
  $L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)$ modella
  la distrubuz di luce incidente

  $L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)$ = quanta luce arriva nel punt $\mathbf{p}$ dalla direzione $\vec{\omega}_i$

Modella un *ambiente di illuminazione*. Esempio di ambienti di illuminazione:
- stanza con finestra aperta
- giornata di sole
- gioranta coperta
- una discoteca



Cioè (nella metafora dei lucidi predecenti): quante "palle da tennis" sono tirate verso $\mathbf{p}$ da ciascuna direzione!

35

Alcune assunzioni semplificatrici

- ✓ L'equazione della radianza vista è troppo onerosa per il computo del lighting in un real-time rendering
  - ⇒ Può essere impiegata nel lighting nei rendering offline
- ✓ Operiamo ora una sequenza di assunzioni semplificatrici, fino a ridurla ad una semplice espressione che può essere computata in modo pratico e veloce
  - ⇒ (per ogni frammento di un rendering in real-time)
  - ⇒ Otterremo così un primo "modello di illuminazione" semplice ed efficiente
  - ⇒ Questo primo modello potrebbe essere raffinato per incrementare la qualità del rendering (avvicinandosi un po' all'equazione di radianza generale) senza aggravare troppo la complessità del computo

36

Alcune assunzioni semplificatrici

- ✓ "Materiale uniforme" (l'intero oggetto esibisce la stesso BRDF). La posizione $\mathbf{p}$ non conta più:

$$L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

- ✓ La BRDF è puramente Lambertiana (o diffiusiva) (vale una costante D, l'albedo). Allora

$$L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} D \;\; L_i(\mathbf{p}, \vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i$$

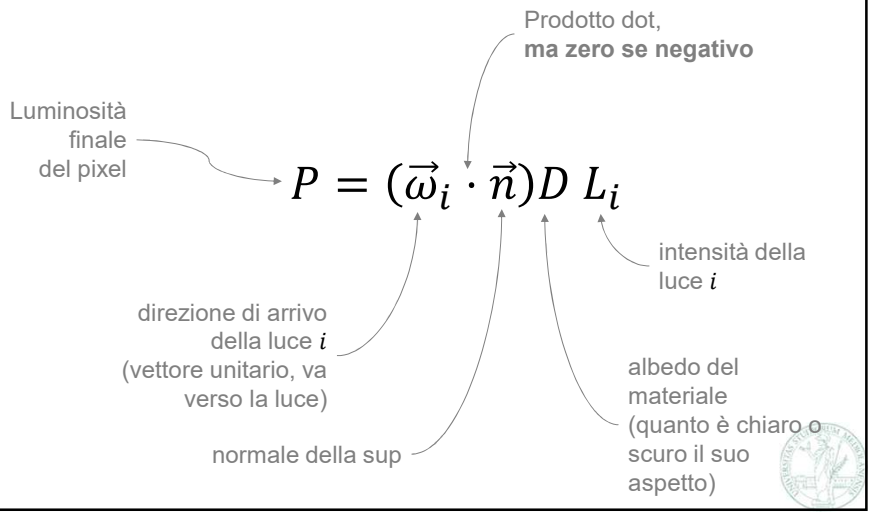
- ✓ La luce proviene solo da poche direzione costanti $\vec{\omega}_i$ (un parametro; per esempio, verso il sole), con intensità L_i dalla direzione i. Allora da integrale passo a sommatoria:

$$L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = \sum_i D \; L_i \; (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$$

37

Equazione di lighting per materiali lambertiani (o puramente diffusivi)

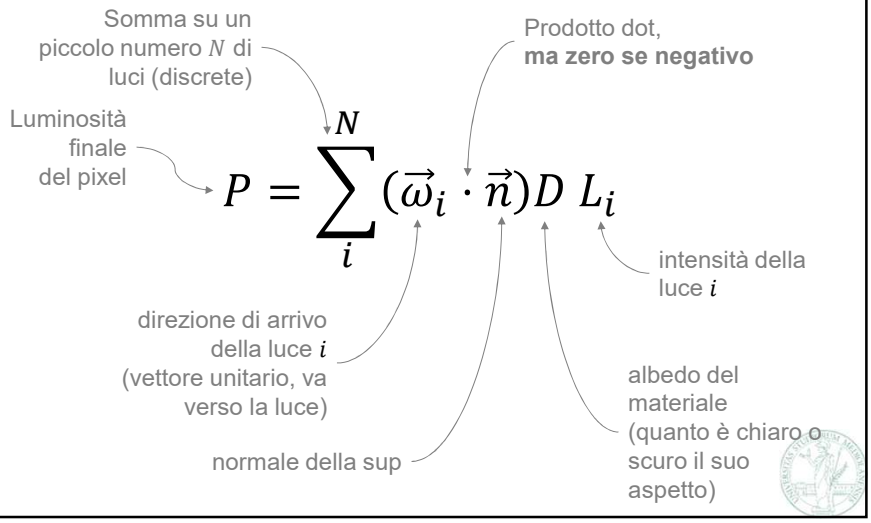
- ✓ L'equazione di lighting risultante per una luce è



38

Equazione di lighting per materiali lambertiani (o puramente diffusivi)

✓L'equazione di lighting risultante per N luci è



39

Cioè in pratica

$$L_r(\mathbf{p}, \vec{\omega}_r) = \sum_{i \in luci} \text{albedo del materiale} \cdot \text{intensità della luce } i \cdot (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$$

direzione di arrivo della luce i

40

Lighting lambertiano… a colori

- ✓ L'equazione di lighting vista sopra sarebbe utilizzabile per immagini in bianco e nero
- ✓ Per passare ad immagini a colori, un modo semplice è usare la stessa equazione separatamente per i canali Rosso, Verde, e Blu
  - ⇒ Questa è un'approssimazione brutale, ma di utilizzo molto comune

"albedo", (per così dire) ma solo per quel che riguarda la luce rossa

canale rosso del pixel risultante

$$P_R = \Sigma(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)\, D_R\, L_{i,R}$$

$$P_G = \Sigma(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)\, D_G\, L_{i,G}$$

$$P_B = \Sigma(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)\, D_B\, L_{i,B}$$

Intensità della luce i sul canale rosso (quanta luce *rossa* viene emessa dalla direzione $\vec{\omega}_i$)

Idem, per il verde

Idem, per il blue

41

Lighting lambertiano… a colori (una riscrittura)

Scalatura del vettore RGB (nessun simbolo)

Questo simbolo donota qui il "prodotto componente per componente"

$$\begin{pmatrix} P_\mathrm{R} \\ P_\mathrm{G} \\ P_\mathrm{B} \end{pmatrix} = \sum_i (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i) \begin{pmatrix} D_\mathrm{R} \\ D_\mathrm{G} \\ D_\mathrm{B} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_{\mathrm{i,R}} \\ L_{i,\mathrm{G}} \\ L_{i,\mathrm{B}} \end{pmatrix}$$

pixel finale

Diffuse color
o **Lambertian color**
o **Base color**.
In pratica, la risposta alla domanda *"di che colore è l'oggetto"* (a prescindere dalla luce usata per illuminarlo)

Intensità della luce i-esima, su ciascun canale (in sostanza: colore e intensità della luce i)

42

Interpretazione intuitiva del modello di Lambert

- ✓ Anche se il modello di materiale diffusivo (o di Lambert) è basato sulla fisica reale, possiamo anche darne una interpretazione geometrica intuitiva
- ✓ Il fattore $(\vec{n}_P \cdot \vec{\omega}_i)$, il coseno dell'angolo fra i due vettori, è anche una misura della similarità fra la direzione $\vec{n}_P$ normale alla superficie e la direzione $\vec{\omega}_i$ «verso la luce»
- ✓ Quindi, la legge del coseno di Lambert dice: «tanto più la superficie è orientata verso la luce (cioè, tanto più la sua normale è simile alla direzione di provenienza della luce), maggiormente chiara ci apparirà.»

43

Esempio: lighting lambertiano con due luci

- ✓ Esempio 2 sorgenti di luce: ogni luce i-esima avrà la propria direzione $\vec{\omega}_{ik}$ e intensità $(L_{\mathrm{Ri}}, L_{\mathrm{Gi}}, L_{\mathrm{Bi}})$
  - ⇒ Maggiore il numero di sorgenti, più complesso l'ambiente di illuminazione, ma più caro il rendering
- ✓ Il lighting è additivo: si sommano i contributi di ciascuna luci

Base color

$$\begin{pmatrix} P_{\mathrm{R}} \\ P_{\mathrm{G}} \\ P_{\mathrm{B}} \end{pmatrix} = (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_{i1}) \begin{pmatrix} D_{\mathrm{R}} \\ D_{\mathrm{G}} \\ D_{\mathrm{B}} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_{\mathrm{R1}} \\ L_{\mathrm{G1}} \\ L_{\mathrm{B1}} \end{pmatrix} + (\vec{n} \cdot \vec{\omega}_{i2}) \begin{pmatrix} D_{\mathrm{R}} \\ D_{\mathrm{G}} \\ D_{\mathrm{B}} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} L_{\mathrm{R2}} \\ L_{\mathrm{G2}} \\ L_{\mathrm{B2}} \end{pmatrix}$$

pixel finale — Direzione luce 1 — Intensità / colore della luce 1 — Direzione luce 2 — Intensità / colore della luce 2

44

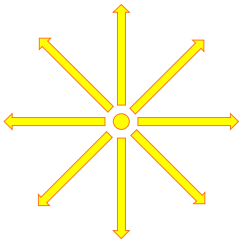
Lighting con più sorgenti di luce: osservazioni pratiche

- ✓ L'aggiunta di ogni luce comporta un aggravio di computazione del lighting
  - ⇒ Dobbiamo computare un altro termine, su ogni frammento della scena
- ✓ In assenza di qualsiasi fonte di luce, il lighting degli oggetti ha zero addendi, e il colore risultante è (0,0,0)
  - ⇒ Com'è sensato che sia: al buio, tutti gli oggetti appaiono neri!
- ✓ All'aggiungere fonti di luce, il lighting si satura verso il bianco, dato che il pixel finale al massimo vale (1,1,1)
  - ⇒ Quindi se vogliamo aggiungere molte luci, ciascuna di loro deve essere fievole

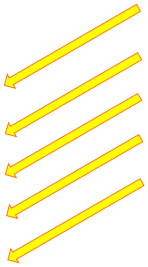
45

Modellazione delle sorgenti di luce

- ✓ Possiamo considerare due tipi di sorgenti di luce:
  - ⇒ "posizionali" : modella fonti di luci vicine e piccole, per es, lampadine
  - ⇒ "direzionali" : modella fonti di luce intense e molto distanti, es, il sole
- ✓ Una luce direzionale rappresenta una luce posta molto lontana (arriva dalla stessa direzione in ogni punto della scena)



LUCE POSIZIONALE



LUCE DIREZIONALE

46

Luci posizionali e direzionali

- ✓ Per la luce direzionale , la direzione di luce incidente $\vec{\omega}_i$ è una costante, e non varia nella scena
  - ⇒ $\vec{\omega}_i$ (vettore unitario) è un parametro settato per ogni luce
- ✓ Una luce posizionale è invece descritta da una posizione nello spazio $\mathbf{p}_L$
  - ⇒ la direzione di luce incidente $\vec{\omega}_i$ sarà diversa per ogni punto $\mathbf{p}$ da illuminare, e sarà data da:

$$\vec{\omega}_i = \frac{\mathbf{p}_L - \mathbf{p}}{\|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}\|}$$

47

Luci posizionali: affievolimento con la distanza (in inglese: *falloff* oppure *decay*)

- ✓ Una luce direzionale ha un'intensità/colore $(L_{\mathrm{R}}, L_{\mathrm{G}}, L_{\mathrm{B}})$ costante su tutta la scena
- ✓ In una luce posizionale, maggiore è la distanza dalla fonte di luce, minore l'intensità della luce ricevuta.
- ✓ l'intensità della luce viene attenuata, per ogni punto illuminato $\mathbf{p}$, da un fattore di affievolimento calcolato in funzione della sua distanza dalla luce $d = \|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}\|$
  - ⇒ La formula fisica è

$$f_{affievoliment} = \frac{1}{d^2}$$

  - ⇒ a volte si usa un esponete minore di 2 , per es 1 per rendere artificialmente meno decisa l'attenuazione
  - ⇒ se esponente scelto è 0, non c'è attenuazione – verifica

48

Modelli (o equazioni) di lighting

- ✓ L'equazione di lighting vista è molto semplice
  - ⇒ consiste esclusivamente di una componente di riflessione diffusiva
  - ⇒ però è physically based – il fenomeno ottico modellato è accuratamente riprodotto (eccetto che per la tricromia RGB)
- ✓ E' un esempio di modello di illuminazione locale
- ✓ Il questo modello:
  - ⇒ il «materiale» viene descritto interamente dal base color (detto anche diffuse color -- o albedo se in bianco e nero)
  - ⇒ L'unico aspetto geometrico rilevante è la normale del punto illuminato.
  - ⇒ In particolare, la direzione di osservazione non conta! Per questo, il modello è detto «view independent».
  - ⇒ Cioè: il «chiaroscuro» non dipende dalla direzione di osservazione: non abbiamo «riflessi» vividi (infatti materiali come gesso ne sono privi)
- ✓ Vedremo in seguito altri modelli, in grado di produrre «riflessi»
  - ⇒ In inglese: highlights, glossy reflections,

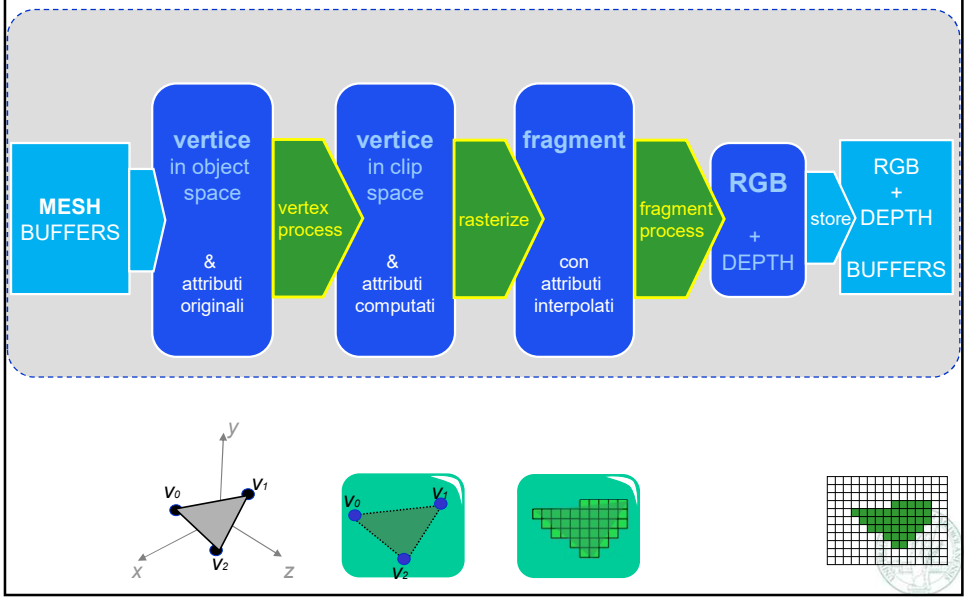
49

Calcolo del lighting nel pipeline di rendering

- ✓ il computo del lighting tipicamente viene svolto nella fase per frammento
  - ⇒ Tecnica nota come "per-pixel lighting", calcolo dell'illuminazione per ogni pixel
  - ⇒ (ma esistono anche varianti e ottimizzazioni)
  - ⇒ Dunque, il lighting avviene dopo la trasformazione dei vertici
  - ⇒ L'equazione di lighting è calcolata in un fragment-shader
  - ⇒ Usando three.js, stiamo usando un fragment-shader fornito dalla libreria
- ✓ I punti e vettori usati nell'equazione di lighting devono, ovviamente, essere tutti espressi nello stesso spazio
  - ⇒ direzione luce, direzione vista, normale, posizione luce…
  - ⇒ Ad esempio, si può scegliere lo spazio di vista: allora, le normali della mesh (originalmente espresse, ovviamente, in spazio oggetto) devono essere trasformate in spazio vista, nella fase di trasformazione per vertice, moltiplicandole per la matrice di model-view
  - ⇒ Anche lo spazio mondo può essere usato (quale matrice occorre usare, allora?)
  - ⇒ (nota: NON in spazio clip: la matrice di proiezione prospettica non può essere usata per trasformare vettori, ma solo punti)
  - ⇒ Le direzioni della luce vanno tutte espresse nello stesso spazio in cui è espressa la normale

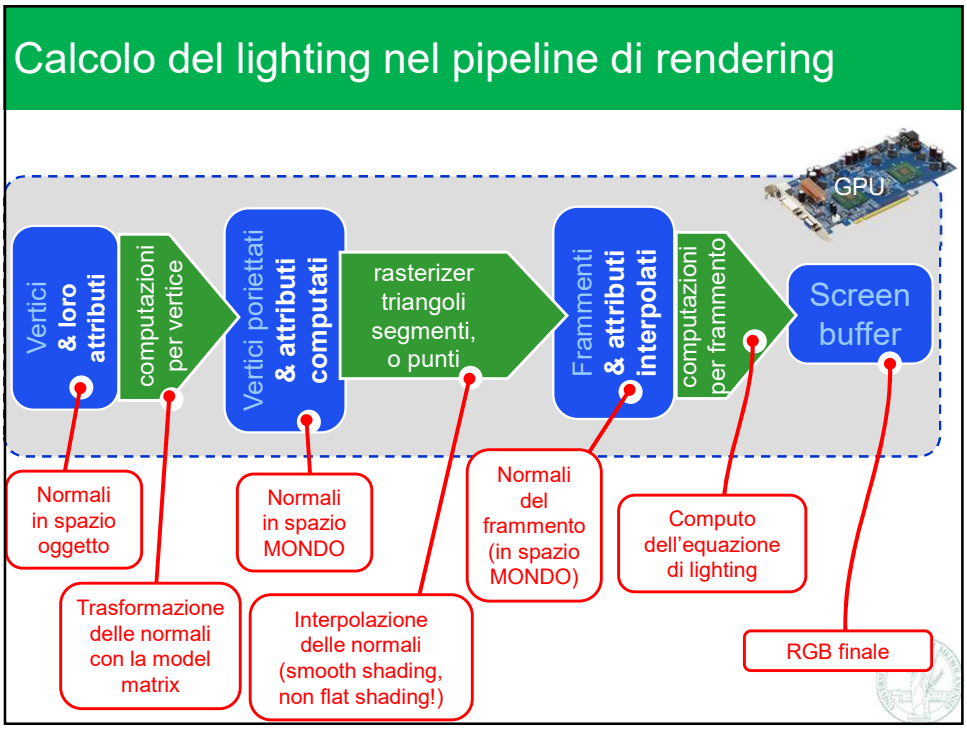
50

Pipeline di rendering



51

Calcolo del lighting nel pipeline di rendering



52

Sperimentiamo il lighting di materiali Lambertiani in three.js (note 1/2)

- ✓ 1: rendiamo il materiale lambertiano

era `Basic` per «no lighting»

```
var materiale = new THREE.MeshLambertMaterial();
var unaMesh = new THREE.Mesh(  …geometria…, materiale );
```

(questo istruisce three.js ad usare il pipeline come descritto sopra)

- ✓ 2: il comando che prima determinava il colore finale, ora, con il lighting, determina settiamo il base color (o diffuse color) del materiale

```
materiale.color.setRGB( … , … , … );
```

- ✓ 3: creiamo le luci e aggiungiamole alla scena ad esempio, una luce direzionale

```
var luceA = new THREE.DirectionalLight();
miaScena.add(luceA);
```

- ✓ 4: settiamo la direzione (chiamata da three.js, per confondere, “position”) e l’intensità-colore della luce (chiamato da three.js color), ad esempio, una luce bianca (il default)

```
luceA.color.setRGB(1,1,1);
luceA.position.set(.4,1,.3); // viene normalizzato
```

Vedere il progetto **`lab06.html`**

54

Sperimentiamo il lighting di materiali Lambertiani in three.js (note 2/2)

Possiamo aggiungere una seconda luce:

```
var luceB = new THREE.DirectionalLight();
luceB.color.setRGB( … );  // intensità / colore
luceB.color.position( … ); // direzione
miaScena.add(luceB);
```

- ✓ nota come la luce si somma alla precedente

Oppure, una luce *posizionale (provare, come erecizio)*.

- ✓ settiamone la posizione (per es, x=2,y=1.5,z=5)

```
var luce2 = new THREE.PointLight();
luce2.position.set(2,1.5,5); // la posizione!
```

- ✓ notare l’effetto affievolimento con la distanza alla *n* (default 2), che può essere controllato con
- ✓ `luce2.decay = …; // 0 = no decay. 2 = decay fisico`

Vedere il progetto **`lab06.html`**

55